



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

---

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΤΑΣΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ**  
**ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΕΣ ΕΚΡΗΞΕΙΣ**

**Διπλωματική Εργασία**

Φωτεινής Σπηλιώτη

**Επιβλέπων**

Μαρίνος Καττής

Αναπληρωτής Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ 2010**

## **Stress response of buried pipelines to nearby explosive detonations**

### **Abstract**

In the present work, the engineering procedures, which has been developed for determining the blast-induced stresses in buried pipelines, are assessed and the possibility of their application to Greece area is explored. Among the existing methods, which have been recorded in the open literature, that of Esparza and his co-workers is the most reliable, since it is based on both theoretical and experimental work. In the present thesis, the method of Esparza and his co-workers is presented step-by-step and the possibility of its application to Greece is investigated.

### **Τασική απόκριση αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου από γειτονικές εκρήξεις**

### **Περίληψη**

Στην παρούσα εργασία, αξιολογούνται οι τεχνικές μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό των τάσεων που αναπτύσσονται σε υπόγειους αγωγούς από εκρήξεις, και διερευνάται η πιθανότητα εφαρμογής τους στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τις μεθοδολογίες που έχουν διεξαχθεί και έχουν καταγραφεί στην ανοιχτή βιβλιογραφία, αυτή του Esparza και των συνεργατών του είναι η πιο αξιόπιστη, καθώς βασίζεται σε θεωρητική και πειραματική δουλειά. Στην παρούσα διπλωματική, η μέθοδος του Esparza και των συνεργατών του παρουσιάζεται βήμα προς βήμα, και διερευνάται η πιθανότητα εφαρμογής τους στην Ελλάδα.

# Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	1
1.2	ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	6
1.3	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΥΠΕΔΑΦΙΩΝ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΩΝ .....	6
1.4	Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ .....	9
1.5	ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	9
1.6	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΙΣ .....	12
1.6.1	Χρονική βαθμίδα επιβράδυνσης της πυροδότησης (time delay) .....	12
1.6.2	Τα διατρήματα και η διάτρηση .....	12
1.6.2.1	Ορισμός.....	12
1.6.2.2	Η ποιότητα της διάτρησης και η επίδραση της στο αποτέλεσμα της πυροδότησης .....	13
1.6.3	Εκρηκτικές ύλες.....	15
1.6.3.1	Ορισμός.....	15
1.6.3.2	Συνήθεις εκρηκτικές ύλες .....	15
1.6.4	Δονήσεις και όργανα μέτρησης δονήσεων, που προέρχονται από πυροδοτήσεις και οι κινήσεις των σωματιδίων του εδάφους.....	17
1.6.4.1	Η εδαφική δόνηση ή εδαφική ταλάντωση .....	17
1.6.4.2	Τα όργανα μέτρησης δονήσεων προερχομένων από πυροδοτήσεις και οι κινήσεις των σωματιδίων του εδάφους.....	18
1.6.5	Ανοιγμένη απόσταση (Scaled Distance).....	19
1.6.5.1	Ορισμός.....	19
1.6.5.2	Τι προκύπτει και πως αξιοποιείται ένα διάγραμμα Scales Distance .....	20

## **2 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΔΑΦΟΣ.....23**

2.1	ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	23
2.1.1	Οι πρώτες προσεγγίσεις της απόκρισης του εδάφους από δυναμικά φορτία εκρήξεων .....	23
2.1.2	Η προσέγγιση των Esparza, et al.....	24
2.1.2. 1	Διόρθωση των συμβατικών μοντέλων προσέγγισης.....	28
2.1.2. 2	Ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις .....	29
2.1.2. 3	Απλοποιημένες εξισώσεις για τις ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις..	31
2.2	ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ .....	33
2.2.1	Γενική περιγραφή της διαδικασίας .....	33
2.2.2	Εκτίμηση της ώθησης που προκαλείται στους αγωγούς .....	34
2.2.3	Προσδιορισμός της εφαπτομενικής παραμόρφωσης του αγωγού .....	37
2.2.4	Προσδιορισμός των διαμήκων παραμορφώσεων του αγωγού .....	41
2.2.5	Προσδιορισμός των τελικών λύσεων με την χρήση δεδομένων από πειράματα.....	45
2.2.6	Οι τελικές εξισώσεις για τις παραμορφώσεις στον αγωγό .....	47
2.2.7	Εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό.....	48

## **3 ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΗΓΗ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΔΑΦΟΣ..... 53**

3.1	ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	53
3.1.1	Η προσέγγιση του Esparza για γραμμική πηγή έκρηξης .....	53

3.2	ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΗΓΗ .....	57
3.2.1	Προσδιορισμός της εφαπτομενικής και διαμήκους παραμόρφωσης από γραμμική πηγή έκρηξης .....	57
3.2.2	Οι τελικές εξισώσεις για τις παραμορφώσεις στον αγωγό .....	58
3.2.3	Εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό .....	61

#### **4 ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΠΗΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΔΑΦΟΣ..... 71**

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	71
4.2	ΠΗΓΗ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΖΕΙ ΓΩΝΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΑΞΩΓΟΥ .....	72
4.3	ΠΗΓΗ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΚΑΝΑΒΟΥ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΓΩΓΟ .....	73
4.4	ΠΗΓΗ ΕΚΡΗΞΗΣ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΚΑΝΑΒΟΥ ΠΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΖΕΙ ΓΩΝΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ .....	75

#### **5 ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ ..... 83**

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	83
5.2	Η ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ .....	83
5.2.1	Το πειραματικό έργο για την ανάπτυξη των εξισώσεων .....	83
5.2.2	Οι εξισώσεις για το βραχώδες έδαφος .....	87
5.3	ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΒΡΑΧΟ ΜΕ ΟΡΥΓΜΑ .....	97
5.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΒΡΑΧΟ ΜΕ ΟΡΥΓΜΑ .....	97

<b>6</b>	<b>ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ.....</b>	<b>103</b>
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	103
6.2	Η ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ.....	106
6.3	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΔΥΟ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	113
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>119</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....</b>	<b>121</b>
A.1	ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	121
A.2	ΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ.....	123
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΙΝΑΚΕΣ.....</b>	<b>131</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>133</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι εκρήξεις που γίνονται κοντά σε υφιστάμενους υπόγειους αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου δημιουργούν επιπρόσθετες καταπονήσεις στον αγωγό, θέτοντας έτσι σοβαρό πρόβλημα στην δομική ασφάλεια του αγωγού. Οι εκρήξεις αυτές προέρχονται κυρίως από την λειτουργία λατομείων, ή από την κατασκευή έργων υποδομής κοντά στον αγωγό. Η ασφαλής λειτουργία των υφιστάμενων αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου, θέτει το σοβαρό πρόβλημα του ελέγχου τέτοιων δραστηριοτήτων και την θέσπιση ορίων αναφορικά με την θέση τους ως προς τους υφιστάμενους αγωγούς μεταφοράς. Ο αποτελεσματικός έλεγχος των δραστηριοτήτων αυτών απαιτεί την αξιόπιστη ανάλυση του δυναμικού προβλήματος της αλληλεπίδρασης πηγής-αγωγού μεταφοράς, προκειμένου να προσδιορισθεί η επιπρόσθετη καταπόνηση που εισάγεται στον αγωγό. Η θεωρητική διαπραγμάτευση του προβλήματος αυτού στα πλαίσια της εφαρμοσμένης δυναμικής, είναι αρκετά πολύπλοκη, και οδηγεί σε ανυπέρβλητες μαθηματικές δυσκολίες. Η μελέτη του προβλήματος εμπλέκει:

- την εξομοίωση της πηγής έκρηξης με ένα ισοδύναμο δυναμικό φορτίο πλήγματος,
- την εξομοίωση του περιβάλλοντος στην πηγή εδάφους με ένα συνεχές μέσο με κατάλληλη μηχανική συμπεριφορά και γεωμετρία, και
- την προσομοίωση της γεωμετρίας και του υλικού του αγωγού μεταφοράς.

Έναι φανερό, ότι, στα πλαίσια της ελαστοδυναμικής του συνεχούς μέσου, αναλυτικά αποτελέσματα για το πρόβλημα αυτό είναι αδύνατο να παραχθούν. Τα πράγματα περιπλέκονται ακόμα περισσότερο από την δυναμική φύση του φορτίου. Το φορτίο

αυτό, είναι ένα πλήγμα (παλμός) που καταπονεί την εδαφική μάζα και διαρκεί ελάχιστα δευτερόλεπτα.

Το αναπτυσσόμενο ελαστικό κύμα που αναπτύσσεται από την πηγή έκρηξης, διαδίδεται στο ελαστικό μέσο, φθάνει στον αγωγό και προξενεί σε αυτόν δυναμικές τάσεις. Λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας και των πολλών συνοριακών συνθηκών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα, ακόμα και η αριθμητική ανάλυσή του καθίσταται δύσκολη. Έτσι, μια λύση που θα είναι σχετικά απλή και αξιόπιστη, θα πρέπει να βασισθεί σε εμπειρικές ή ημιεμπειρικές προσεγγίσεις, που θα βασίζονται σε συνδυασμένη θεωρητική και πειραματική έρευνα. Όπως προκύπτει από την σχετική βιβλιογραφία, μια τέτοια προσέγγιση έχει ακολουθηθεί από τις ενδιαφερόμενες εταιρίες φυσικού αερίου στην Αμερική και σε άλλες χώρες. Πριν αναπτυχθούν οι εμπειρικές αυτές προσεγγίσεις του δυναμικού προβλήματος, οι εταιρίες φυσικού αερίου είχαν υιοθετήσει μια απλούστερη, αλλά αποτελεσματική προσέγγιση του προβλήματος, που ήταν ο έλεγχος της ταχύτητας δόνησης του εδάφους κοντά στον αγωγό, που προκαλείται από μια έκρηξη.

Η προσέγγιση αυτή εξακολουθεί και σήμερα να αποτελεί την βάση για την καθιέρωση των ορίων ασφαλούς απόστασης, των πηγών έκρηξης από τους αγωγούς μεταφοράς. Για παράδειγμα, ένα όριο της ταχύτητας του υλικού σωματιδίου του εδάφους, που είναι της τάξης των 1.0 in/sec (25.4 mm/sec) ως 2.0 in/sec (56.8 mm/sec), έχει υιοθετηθεί από πολλές πολιτείες της Αμερικής για κατασκευές που βρίσκονται πάνω από το έδαφος. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται και για τις περιπτώσεις των υπόγειων αγωγών μεταφοράς. Αυτό το κριτήριο της ταχύτητας των εδαφικών σωματιδίων προτάθηκε από τον Grandell (1949) για τις επιδράσεις των εδαφικών ταλαντώσεων που προξενούνται από πυροδοτήσεις στα κτίρια. Πρόσφατο έρευνητικό έργο που διερευνά τις επιπτώσεις των υπόγειων γομώσεων πάνω σε κτίρια, όπως αυτό του Dvorak (1962) στην Τσεχοσλοβακία και των Nicholls (1958), του Edwards και Northwood (1960), και των Siskind, et al., (1976,1980), δείχνουν ότι τα κριτήρια της εδαφικής ταχύτητας είναι αποδεκτά, όταν χρησιμοποιούνται για κατασκευές πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Παρόλα αυτά, ένας αγωγός μεταφοράς δεν είναι κτίριο. Το κριτήριο της ταχύτητας των 2.0 in/sec (56.8 mm/sec) είναι περισσότερο εφαρμόσιμο σε κτίρια κατοικίας. Παρέχει μια εικόνα του εύρους της ταχύτητας του εδάφους που γειτνιάζει με την κατασκευή που μας ενδιαφέρει, και



όχι μέσα σε αυτή. Επίσης, το κριτήριο αυτό είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα και την απόσταση.

Το 1964, οι Mc Clure και άλλοι, παρουσίασαν εξισώσεις πρόβλεψης των τάσεων σε έναν αγωγό μεταφοράς που αναπτύχθηκαν στο Battelle Memorial Institute, για την Pipeline Research Committee (PRCI) της American Gas Association (A.G.A.). Οι εξισώσεις αυτές ήταν ελαστικές λύσεις που βασίζονταν στην εμπειρική εξίσωση του Morris (1950) για την εδαφική μετατόπιση, και στις παρακάτω υποθέσεις : 1) η μετακίνηση του αγωγού μεταφοράς ισούται με την μετακίνηση του περιβάλλοντος εδάφους, και 2) δεν συμβαίνει διάθλαση της δόνησης. Όταν αναπτύχθηκαν οι εξισώσεις αυτές, δεν υπήρχαν πειραματικά δεδομένα ώστε να συγκριθούν με τις εξισώσεις Battelle. Η εμπειρική εξίσωση Battelle για την εδαφική μετατόπιση, ισχύει μόνο για αποστάσεις μεταξύ των σημείων της έκρηξης και του αγωγού μεταφοράς που είναι μεγαλύτερες από 30.5 m. Παρόλα αυτά, αυτές οι εξισώσεις μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν λανθασμένα, αν κάποιος δεν είναι ενήμερος των περιορισμών που έχουν τεθεί για την απόσταση.

Εξαιτίας των περιορισμών πάνω στα κριτήρια της επιφανειακής εδαφικής κίνησης και των Battelle εξισώσεων, απαιτείται μια καλύτερη μέθοδος για την εκτίμηση των τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό από γειτονικές πυροδοτήσεις. Το 1975, η PRC με το SRI (Southwest Research Institute) ξεκίνησαν ένα ερευνητικό πρόγραμμα πυροδοτήσεων με σκοπό να αναπτυχθούν τεχνικές διαδικασίες για την πρόβλεψη των τάσεων σε έναν αγωγό μεταφοράς, που προκαλούνται από γειτονικές πυροδοτήσεις υπόγειων γομώσεων, ιδιαίτερα αυτών που είναι σε μικρότερη απόσταση από 30 m από τον αγωγό. Στο πρώτο έργο του προγράμματος, το SwRI έκανε μία ανασκόπηση της θεωρίας που ήταν σχετική με το ερευνητικό έργο, και χρησιμοποιώντας τη θεωρία ομοιότητας ανέπτυξε συναρτησιακές σχέσεις, για την απόκριση του αγωγού. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε φυσική κλίμακα για να παραχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό των τάσεων για μια σημειακή γόμωση, και για σημειακές πηγές σε παράλληλες γραμμές, που βρίσκονται σε ένα ομοιογενές υλικό. Οι Westine et al., (1978), δημοσίευσαν τα αποτελέσματά τους σε μια τεχνική έκθεση το 1979, που περιγράφει λεπτομερώς το ερευνητικό αυτό έργο.

Το 1979, χρηματοδοτήθηκε η συνέχεια του ερευνητικού έργου από την PRCI για την SwRI για να επεκταθεί η εφαρμογή των λύσεων που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο πρόγραμμα και σε άλλες γεωμετρίες τοποθέτησης των εκρηκτικών, καθώς και σε άλλες τοποθεσίες τους στο πεδίο. Συνολικά μελετήθηκαν πειραματικά και αναλυτικά πέντε διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης εκρηκτικών. Διεξήχθησαν εβδομήντα δοκιμές για να αποκτηθούν πειραματικά δεδομένα από πυροδοτήσεις σημειακής πηγής, που ήταν τοποθετημένη σε ίσο και σε μεγαλύτερο βάθος σε σχέση με τον αγωγό, από πυροδοτήσεις γραμμικής πηγής και κανάβου πηγής, που είναι προσανατολισμένη σε διάφορες γωνίες ως προς τον αγωγό, από πυροδοτήσεις με πηγές τοποθετημένες σε έδαφος που αποτελείται από δυο υλικά. Επιπλέον, έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για να προσδιοριστούν οι επιδράσεις ενός ανοιχτού ορύγματος ανάμεσα στη πηγή έκρηξης στον αγωγό. Ως αποτέλεσμα αυτής της δεύτερης έρευνας, εξήχθησαν βελτιωμένες εξισώσεις για την εκτίμηση των τάσεων που αναπτύσσονται σε αγωγούς από σημειακές ή γραμμικές πηγές, οι οποίες πυροδοτούνται μέσα στο έδαφος. Οι νέες εξισώσεις που αναπτύχθηκαν εκτός του ότι είναι πιο ακριβείς από τις παλαιότερες, είναι και πιο απλές στην εφαρμογή τους. Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκαν εμπειρικές μέθοδοι που απλοποιούν τις πιο περίπλοκες γεωμετρίες πηγών σε ισοδύναμες σημειακές ή γραμμικές πηγές. Αυτές οι εξισώσεις παρουσιάζονται στο [Esparza et al., 1981].

Στο πρόβλημα της χρήσης ενός ορύγματος ανάμεσα στον αγωγό και στην εκρηκτική πηγή, προκειμένου να μειωθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αγωγό μεταφοράς από πυροδότηση, έχει αναπτυχθεί ένα αξιολογικό έργο. Ο Barkan (1962) στην ΕΣΣΔ, είχε επιτελέσει ένα σημαντικό έργο πάνω στην ανάλυση της επίδρασης των ορυγμάτων και άλλων εμποδίων στη μείωση των εδαφικών ταλαντώσεων. Επίσης, ο R.D. Woods (1968) στις ΗΠΑ, είχε μελετήσει πειραματικά την επίδραση τέτοιων αρυγμάτων πάνω σε αγωγούς μεταφοράς. Αυτοί οι δύο ερευνητές έδειξαν, ότι, ένα όρυγμα με μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενο με το μήκος κύματος της ταλάντωσης των σωματιδίων του εδάφους, μπορεί να μειώσει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των σωματιδίων του εδάφους. Αργότερα από τους Lysmer και Waas (1972), τους Segol et al. (1978), και τους May and Bolt (1982), δείχθηκε ότι κανένα από τα υπολογιστικά και πειραματικά αποτελέσματα που βρέθηκαν, που μοντελοποιούν ή χρησιμοποιούν μια πυροδότηση ως πηγή σεισμικών κυμάτων, επηρεάζεται σημαντικά από ένα όρυγμα. Αυτό το αποτέλεσμα, ήταν η ώθηση για τον Esparza (1984 και 1985) για να

πραγματοποιήσει μια σειρά πειραμάτων που χρηματοδοτήθηκαν από ένα εσωτερικό ερευνητικό πρόγραμμα της SwRI, για να παραχθούν τα πειραματικά στοιχεία που αφορούν την επίδραση των ορυγμάτων στις τάσεις που αναπτύσσονται σε έναν υπόγειο αγωγό μεταφοράς. Τα αποτελέσματα του προγράμματος αυτού έδειξαν ότι, τα ορύγματα μπορούν να είναι αποτελεσματικά στο να μειωθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε έναν αγωγό μεταφοράς σε ποσοστό 87% της τιμής των τάσεων που αναπτύσσονται χωρίς το όρυγμα. Λόγω του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων, δεν ήταν δυνατόν να αναπτυχθεί μια μέθοδος για να προβλέψει την επίδραση των ορυγμάτων πάνω στις τάσεις, που αναπτύσσονται στον αγωγό από πυροδοτήσεις. Για την καλύτερη κατανόηση αυτού του φαινομένου απαιτείται παραπάνω έρευνα.

Επειδή οι εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη των τάσεων, που αναπτύσσονται σε έναν αγωγό μεταφοράς από κοντινές πυροδοτήσεις στηρίζονται σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ομοιόμορφα εδάφη, η εφαρμογή τους σε πυροδοτήσεις σε περιπτώσεις βράχων δεν είχε επιβεβαιωθεί. Με βάση αυτό, το 1985 ξεκίνησαν πολλές συζητήσεις ανάμεσα σε Algonquin Gas Transmission Company (AGTC) και το SwRI, σχετικά με την κατασκευή ενός έργου οδοποιίας στο New Jersey, στο οποίο υπήρχε η δυνατότητα να γίνει παρακολούθηση των τάσεων στον αγωγό από πυροδοτήσεις κοντά σε βράχους, όπου υπήρχαν στην περιοχή. Επίσης, οι Algonquin's ήθελαν πολύ να εξαχθούν τέτοια χρήσιμα συμπεράσματα με αποτέλεσμα να συναινέσουν ώστε ένα τμήμα της γραμμής μεταφοράς της να αλλάξει θέση. Το SwRI σχεδίασε για το PRCI μια μικρή έρευνα για να εξαχθούν τιμές για τα δεδομένα των τάσεων στους αγωγούς από πυροδοτήσεις σε βράχο. Αυτά τα νέα δεδομένα τα σύγκρινε με τις εξισώσεις από τα δεδομένα πυροδότησης στο έδαφος που είχαν εξαχθεί σε προηγούμενο ερευνητικό πρόγραμμα. Οι PRCI-A.G.A χρηματοδότησαν το SwRI για να αναλάβει μια νέα έρευνα για τις πυροδοτήσεις. Αυτή η έρευνα ονομάστηκε PR-I5-712.

Το 1981 μελετήθηκαν μια σειρά από εικοσιένα πυροδοτήσεις που έγιναν σε βράχο. Η έκθεση με τίτλο "Pipeline Response To Blasting In Rocks", (Esparza 1991) περιλαμβάνει τις μέγιστες τιμές των τάσεων που μετρήθηκαν, καθώς και τις σχετικές αναλύσεις που έγιναν. Επίσης, περιέχει μια λεπτομερή περιγραφή των πειραμάτων, καθώς και μια περιληπτική αριθμητική εφαρμογή υπολογισμού σε πρακτικά

προβλήματα. Ακόμα, περιγράφονται το σύστημα μέτρησης των τάσεων που χρησιμοποίησε το SwRI, καθώς και άλλα συστήματα καταγραφής.

## 1.2 ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Στην παρούσα εργασία, γίνεται μια κριτική παρουσίαση των βασικότερων μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα στην διεθνή βιβλιογραφία, για τον προσδιορισμό των επιπρόσθετων τάσεων που προξενούνται σε έναν αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου λόγω εκρήξεων. Στόχος της διπλωματικής είναι να συζητήσει τις υποθέσεις και παραδοχές των μεθόδων αυτών στα πλαίσια της μηχανικής του συνεχούς μέσου, και να διερευνήσει την δυνατότητα εφαρμογής της στην Ελληνική πραγματικότητα.

## 1.3 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΥΠΕΔΑΦΙΩΝ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΩΝ

Το πρόβλημα των υπεδάφίων πυροδοτήσεων κοντά σε αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου χωρίζεται σε δύο μέρη: 1) Στο πρώτο μέρος –**θεωρία ομοιότητας**– χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές αναλύσεις και δεδομένα από πειράματα δημιουργώντας εξομοιώσεις, για να εκτιμηθούν η μέγιστη εδαφική μετατόπιση και η ταχύτητα του υλικού σωματιδίου του εδάφους. Αυτό σχετίζεται με τον αγωγό, γιατί οι κινήσεις των σωματιδίων του εδάφους προσδιορίζουν τις τάσεις που τελικά αναπτύσσονται στον αγωγό μεταφοράς. 2) Στο δεύτερο στάδιο στη θεωρία ομοιότητας χρησιμοποιήθηκαν η αρχή της διατήρησης της μάζας και της ορμής καθώς και προσεγγιστικές ενεργειακές μέθοδοι ώστε να ληφθούν οι συναρτησιακές σχέσεις για τις μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις του αγωγού μεταφοράς. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από εξήντα δοκιμές, ώστε να αναπτυχθούν εξισώσεις που να εκτιμούν τις μέγιστες τάσεις στον αγωγό, από σημειακή ή γραμμική παράλληλη πηγή που εκρήγνυται μέσα σε ομοιογενές έδαφος. Ο μεγάλος αριθμός και η ποικιλία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, καθιστούν

τις λύσεις εφαρμόσιμες στις περισσότερες περιπτώσεις πυροδότησης μέσα στο έδαφος, κοντά σε αγωγό.

Ακόμα, η εφαρμοσιμότητα αυτών των εξισώσεων επεκτάθηκε ώστε να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των τάσεων που αναπτύσσονται σε αγωγό μεταφοράς από πηγές με σύνθετες γεωμετρίες. Τα απαραίτητα στοιχεία αποκτήθηκαν από οκτώ δοκιμές πεδίου. Σε αυτά χρησιμοποιήθηκαν εκρηκτικές ύλες που ήταν τοποθετημένες σε ευθεία γραμμή στραμμένη ως προς τον αγωγό, σε κánaβο παράλληλο με τον αγωγό και σε κánaβο με στροφή ως προς τον αγωγό. Όλες αυτές οι γεωμετρίες ήταν όπως και ο αγωγός υπεδάφιος. Έπειτα, αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για να αναπτυχθούν εμπειρικές μέθοδοι απλοποίησης των πολύπλοκων αυτών γεωμετριών σε ισοδύναμη πηγή με μορφή σημείου ή γραμμής, ανάλογα με την απόσταση των εκρηκτικών υλών από τον αγωγό. Χρησιμοποιώντας μεθόδους απλοποίησης, οι τιμές από τα πειραματικά δεδομένα από τις πηγές με πολύπλοκες γεωμετρίες είναι πολύ ικανοποιητικές σε σύγκριση με τις τιμές που προέκυπταν από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν για τη πηγή με μορφή γραμμής και για την πηγή σημείο.

Για τη διαχείριση - εξέταση της ασφάλειας του αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου από πυροδοτήσεις, αντιμετωπίζονται τρία βασικά ερωτήματα, τα οποία αποτελούν και τα ουσιαστικά ζητούμενα μιας τεχνικής μελέτης για την ασφάλεια του αγωγού. Αυτά τα ερωτήματα είναι :

- α. Ποια είναι η επιτρεπόμενη μέγιστη ταχύτητα δόνησης (PPV ή  $U_{max}$  – το θεωρούμενο όριο ασφαλείας), έτσι που να αποφεύγονται βλάβες και δυσμενείς επιπτώσεις στον αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου από πυροδότηση;
- β. Ποιοι είναι οι βασικοί κανόνες σχεδιασμού των πυροδοτήσεων, έτσι ώστε δεδομένης της απόστασης των εκρήξεων από τον αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου, να μη σημειώνονται υπερβάσεις της τάσης διαρροής του αγωγού;
- γ. Ποια η διαδικασία καταγραφής των προκαλούμενων δονήσεων, δηλαδή πως θα πιστοποιείται και θα διασφαλίζεται ότι οι θεωρητικοί υπολογισμοί και παραδοχές λειτουργούν σωστά στην πράξη, και ότι πράγματι δεν σημειώνονται υπερβάσεις ως προς την ασφάλεια του αγωγού;

Οι ολοκληρωμένες απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά, αποτελούν και την ορθολογικότερη διαχείριση του θέματος της ασφάλειας του αγωγού μεταφορά φυσικού αερίου. Σε κάθε περίπτωση, οι ενόργανες παρατηρήσεις και η αξιολόγηση αξιόπιστων καταγραφικών δεδομένων, προσφέρουν την καλύτερη τεκμηρίωση, τον υψηλότερο βαθμό ασφαλείας καθώς και ικανοποιητική ευελιξία στη διαχείριση και αντιμετώπιση των πιθανών κινδύνων.

Στην εργασία μελετώνται επιπλέον τρία βασικά θέματα :

- 1) Το πρώτο από αυτά αφορά την περίπτωση που ο αγωγός βρίσκεται ανάμεσα στην εκρηκτική πηγή και σε ελεύθερο έδαφος. Η έλλειψη εδάφους πίσω από τον αγωγό επαυξάνει τις τάσεις αναπτύσσονται σε αυτόν. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη αδρανειακής αντίστασης.
- 2) Στο δεύτερο αναφέρεται μια βιβλιογραφική έρευνα που διεξήχθη με σκοπό να προσδιοριστούν οι επιδράσεις των εμποδίων μεταξύ του αγωγού και της πηγής έκρηξης. Εδώ επιπλέον, από ένα σύνολο πειραμάτων πεδίου χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις των τιμών των τάσεων, με σκοπό να αναπτυχτεί μια εξίσωση που να προβλέπει τις επιδράσεις που έχει ένα όρυγμα στις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό μεταφοράς, ως συνάρτηση των ανηγμένων αποστάσεων. Επειδή, τα πειραμματικά δεδομένα ήταν λίγα, αυτή η εξίσωση είναι έγκυρη μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν οι αδιάστατοι παράμετροι που προτείνονται.
- 3) Στο τρίτο από αυτά υλοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα με σκοπό να συμπερανθεί αν υπάρχει δυνατότητα αναπαραγωγής του προβλήματος των πυροδοτήσεων στην περίπτωση που ο αγωγός βρίσκεται σε βράχο. Σε αυτά τα πειράματα μετρήθηκαν οι τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό μεταφοράς, καθώς και οι εδαφικές κινήσεις. Το ζητούμενο ήταν να αναπτυχτεί μια εξίσωση, η οποία να προσδιορίζει μια απόσταση μεταξύ του αγωγού και των εκρηκτικών τέτοια, που για την εκτίμηση κατά προσέγγιση της απόκρισης του αγωγού, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις για την σημειακή πηγή.

## **1.4 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ**

Η διπλωματική αποτελείται από επτά κεφάλαια και τρία παράρτηματα. Στα κεφάλαια δύο, τρία, τέσσερα, πέντε, και έξι αναπτύσσεται η αντιμετώπιση των πυροδοτήσεων σε σχέση με την ασφάλεια του αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου στην Αμερική. Παρατίθενται οι εξισώσεις που προβλέφθηκαν και οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν. Περιλαμβάνονται οι ορισμοί των παραμέτρων και των συμβόλων καθώς και εφαρμογές τους, μια ολοκληρωμένη τεχνική έκθεση στην οποία περιγράφονται με μεγάλη λεπτομέρεια το υπόβαθρο της ερευνητικής προσπάθειας, το πειραματικό πρόγραμμα και τα αποτελέσματα του, η εξέλιξη της κίνησης του εδάφους και τα αποτελέσματα των τάσεων που ασκούνται στον αγωγό, και η χρήση μερικών από τις εξισώσεις και μεθόδους σε αριθμητικά παραδείγματα. Επιπλέον, παρουσιάζονται κάποιες συζητήσεις σε θέματα και οι προϋποθέσεις τους καθώς και οι δυνατότητες κάθε λύσης που αναπτύχθηκε, η ικανότητα και η ευλιγυσία της χρήσης των εξισώσεων των τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό μεταφοράς από πηγή έκρηξης με μορφή σημείου ή παράλληλης γραμμής, εναλλακτικές μορφές αυτών των εξισώσεων, μια ολοκληρωμένη εικόνα των τάσεων που ασκούνται στον αγωγό και παράγωγες θεωρίες συντελεστών ασφαλείας. Τέλος, αναφέρονται κάποιες άλλες διαδικασίες που βρίσκονται σε νομικούς κανόνες όσον αφορά τις εκρήξεις που περιορίζουν το να γίνουν εκρήξεις κοντά σε αγωγό. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την ανάλυση της μεθόδου του Esparza, καθώς και προτάσεις για την βελτίωσή της και εφαρμογή της στο Ελληνικό πεδίο. Το παράρτημα Α είναι οι αριθμητικές εφαρμογές της μελέτης, το Β πίνακες βασικών στοιχείων για τις εφαρμογές, και το Γ περιέχει νομογραφήματα για τον άμεσο υπολογισμό της τάσης.

## **1.5 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ**

Οι σύγχρονοι διεθνείς κανονισμοί καθορίζουν ασφαλή όρια της μέγιστης τιμής της ταχύτητας δονήσεως των σωματιδίων του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη τους και την τιμή της συχνότητας δονήσεως.

Σύμφωνα με τον κανονισμό του Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement (O.S.M.R.E) των Η.Π.Α. (1983), που αντικατέστησε τα προηγούμενα

δεδομένα του U.S. Bureau of Mines, το κριτήριο ζημιάς σε μία κατασκευή από δονήσεις, που προέρχονται από πυροδοτήσεις, δίνεται στο Σχήμα 1-1 και είναι συνάρτηση όχι μόνο της μέγιστης ταχύτητας δονήσεως αλλά και της σημειούμενης συχνότητας.

Αυστηρότερος του ανωτέρω κανονισμού είναι ο γερμανικός κανονισμός DIN 4150 (1984), που αντικατέστησε τον αναθεωρηθέντα το 1970 παλιότερο κανονισμό του 1938 και αναφερόταν σε φάσμα συχνοτήτων 8-80 Hz. Ο κανονισμός αυτός καθορίζει ότι, το μεγαλύτερο εκ των τριών διανυσματικών μεγεθών ( $U_L, U_T$  και  $U_V$ ) της ταχύτητας δονήσεως στην επιφάνεια του εδάφους παραπλεύρως της κατασκευής, δεν πρέπει να υπερβαίνει τις τιμές του Πίνακα 1-1 για διάφορες κλίμακες συχνοτήτων.

**Πίνακας 1-1: Οι μέγιστες επιτρεπομενες τιμές της ταχυτητας δονήσεως των σωματιδίων σε συνάρτηση με την συχνότητα για διάφορα είδη κατασκευών (DIN 4150,1984)**

Είδος κατασκευής	Ταχύτητα (mm/s)		
	<10 Hz	10-15 Hz	50-100 Hz
Κτίρια γραφείων και εργοστάσια	20	20-40	40-50
Συνήθεις κατασκευές οικιών	5	5-15	15-20
Κατασκευές που λόγω της ευαισθησίας τους δεν εντάσσονται στις κατηγορίες 1 και 2	3	3-8	8-10

Ο ινδικός κανονισμός (CMRI standards), δίνει τα παρακάτω μέγιστα όρια ταχύτητας δονήσεως του εδάφους σε σχέση με την σημειούμενη συχνότητα δονήσεως.

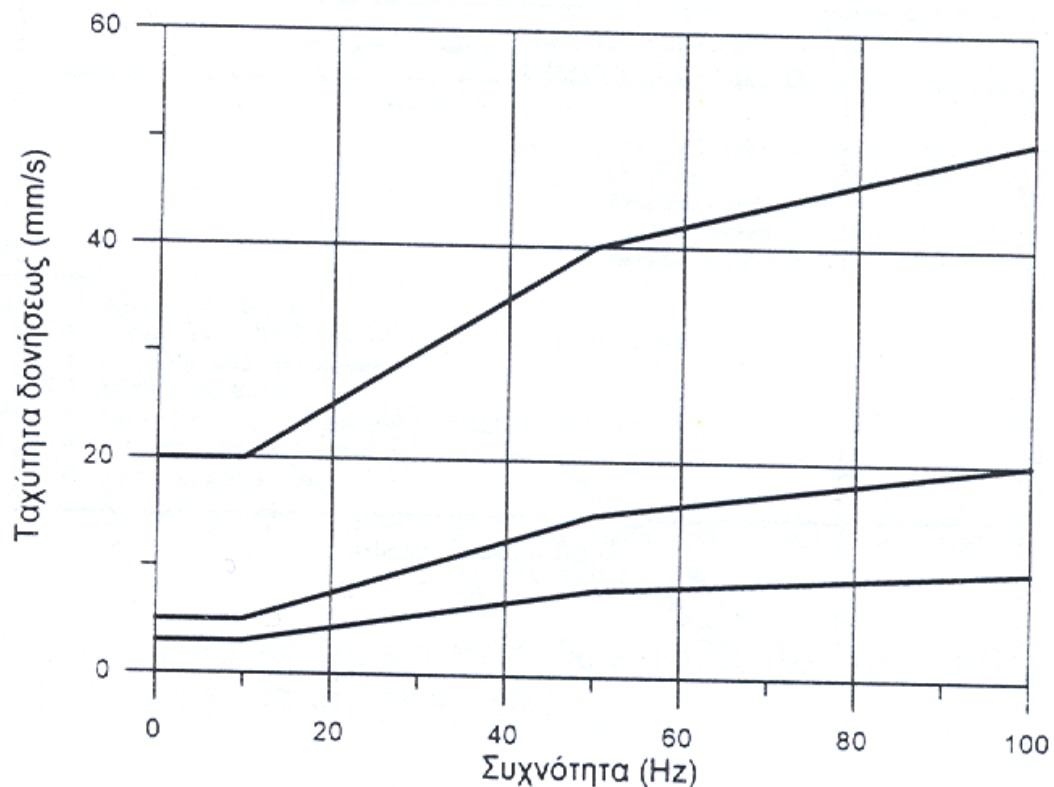
**Πίνακας 1-2: Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της μέγιστης συνιστώσας ταχύτητας δονήσεως σε συνάρτηση με την συχνότητα, για διάφορα είδη κατασκευών σύμφωνα με τον ινδικό κανονισμό (CMRI standards)**

Είδος κατασκευής	Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα	
	$f \leq 24$ Hz	$f \geq 24$ Hz
Συνήθεις κατασκευές οικιών	5.0	10.0
Βιομηχανικά κτίρια	12.5	25.0
Ιστορικά μνημεία, ευαίσθητες κατασκευές ηλικίας > 50 ετών	2.0	5.0



Ο ισχύων Ελληνικός Κανονισμός Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (ΦΕΚ 931, Τ.Β. 1984), καθορίζει στο άρθρο 84 παραγ. 1 εδ. Β ότι: Η μέγιστη ταχύτητα ταλαντώσεως των σωματιδίων του εδάφους σε θέσεις κτισμάτων και δημοσίων έργων που παρουσιάζουν ευαισθησία στις δονήσεις (απαγορεύεται) να είναι μεγαλύτερη από 50 mm/s. Ειδικά για την προστασία περιοχών ή κατασκευών, που παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις δονήσεις πρέπει να περιορίζεται το πιο πάνω όριο ταχύτητας και να γίνεται χρήση δονησιογράφου. Όπως μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει, η συχνότητα κατά την οποία συμβαίνει η μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης, δεν λαμβάνεται υπόψη, σε αντίθεση με όλους τους σύγχρονους κανονισμούς. Παρατηρείται επίσης ότι, η τιμή των 50 mm/s είναι εξαιρετικά υψηλή, σε σύγκριση με τα όρια, που δίνουν οι υπόλοιποι κανονισμοί.

Η γραφική παρουσίαση του γερμανικού κανονισμού δίνεται στο Σχήμα 1-1.



**Σχήμα 1-1 : Γραφική παρουσίαση του γερμανικού κανονισμού ασφαλών ορίων δονήσεως του εδάφους Din 4150 (1984)**

## 1.6 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΙΣ

### 1.6.1 Χρονική βαθμίδα επιβράδυνσης της πυροδότησης (time delay)

Η εκτεταμένη χρήση μέσων επιβράδυνσης εισήχθη στη μεταλλευτική βιομηχανία την δεκαετία του 1940 και έτυχε έκτοτε ευρείας αποδοχής, ως τρόπος αποδοτικότερης χρήσης των εκρηκτικών υλών για τη θραύση του πετρώματος (περισσότερος όγκος) και για τη βελτίωση του θρυμματισμού του. Η εφαρμογή των μέσων επιβράδυνσης είχε επίσης θετική επίδραση στην μείωση της ταχύτητας δονήσεως, που παράγεται από τις πυροδοτήσεις. Σειρά από πειράματα, που εκτέλεσε το Γραφείο Μεταλλείων των Η.Π.Α. (Devine, 1966) σε λατομείο ασβεστόλιθου με χρήση μιας σειράς διατρημάτων απέδειξαν ότι, εάν μία ανατίναξη πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα ή με διαδοχική έκρηξη των διατρημάτων, η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του εδάφους, που σημειώνεται σε απόσταση  $R$  από τη θέση έκρηξης διαφοροποιείται σημαντικά. Στην περίπτωση ταυτοχρόνου έκρηξης έχει τη μέγιστη τιμή, ενώ με την αύξηση του χρόνου επιβράδυνσης μεταξύ των διατρημάτων μειώνεται μέχρι μία ελάχιστη τιμή. Η χρήση του χρόνου επιβράδυνσης μείωσε τη μέγιστη ταχύτητα δονήσεως 3-5 φορές. Σε όλες τις περιπτώσεις η κλίση των ευθειών, η οποία εκφράζει την απόσβεση της μέγιστης ταχύτητας δονήσεως των σωματιδίων με την απόσταση, παρέμεινε σταθερή. Άρα, η απόσβεση της μέγιστης ταχύτητας των σωματιδίων δεν εξαρτάται από τη χρονική βαθμίδα επιβράδυνσης, παρά μόνον από το είδος του γεωλογικού υποβάθρου.

### 1.6.2 Τα διατρήματα και η διάτρηση

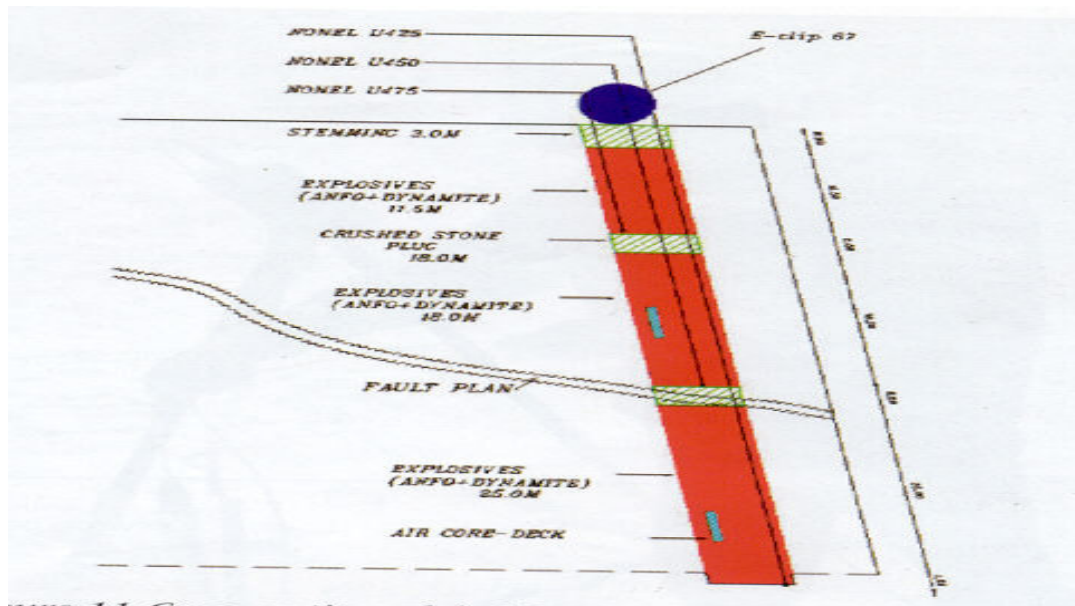
#### 1.6.2.1 Ορισμός

Το διάτρημα στις πυροδοτήσεις είναι μια τρύπα που διανοίγεται στο έδαφος από κρουστικό ή κρουστικό-περιστροφικό γεωτρήπανο, η οποία γεμίζεται με εκρηκτική ύλη και άλλα απαραίτητα υλικά. Αυτό από μόνο του ή ως σύνολο διατρημάτων αποτελεί την πηγή έκρηξης στις πυροδοτήσεις. Η διαδικασία κατασκευής

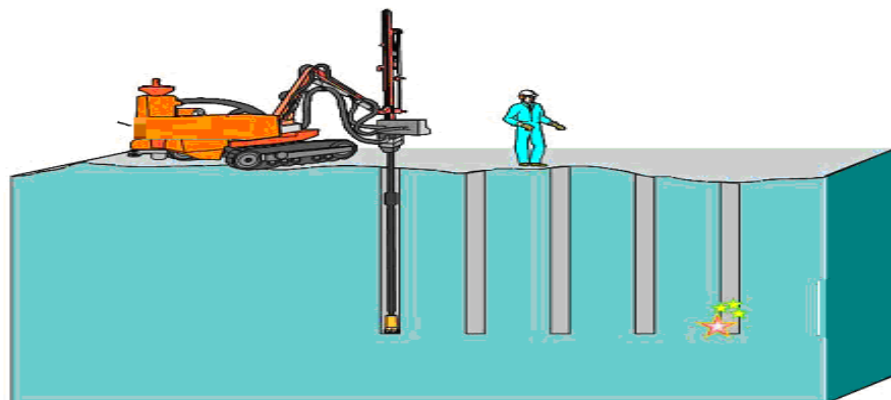
διατρημάτων

καλείται

διάτρηση.



Σχήμα 1- 2: Διακεκομμένη γόμωση διατρημάτων



Σχήμα 1-3 : Κατασκευή διατρημάτων

#### 1.6.2.2 Η ποιότητα της διάτρησης και η επίδραση της στο αποτέλεσμα της πυροδότησης

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της διάτρησης αποτελούν η ευθύτητα, η γωνία και το βάθος του διατρήματος, η διευκόλυνση της γόμωσης, η σωστή επιλογή διατρητικής στήλης αλλά και κοπτικού άκρου. Η ευθύτητα του διατρήματος παίζει σημαντικό ρόλο. Σε ορισμένες χώρες ο έλεγχος για την ευθύτητα

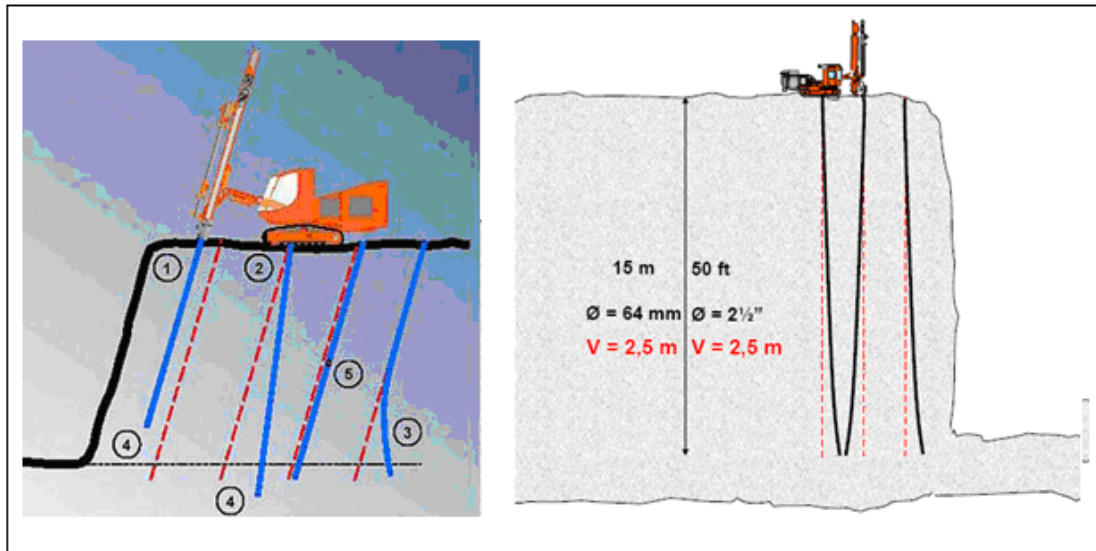
του διατρήματος ορίζεται από τη νομοθεσία, υπάρχουν όμως και παραδείγματα από επιχειρήσεις που θέτουν τέτοιους όρους στα συμβόλαιά τους που αφορούν την σωστή εκτέλεση της λειτουργίας διάτρησης για την ευθύτητα του διατρήματος.

Στη διαδικασία διάτρησης η ομαλότερη και γρηγορότερη διάτρηση επιφέρει περισσότερα μέτρα διάτρησης ανά βάρδια, μειώνει την πιθανότητα να «κολλήσει» η διατρητική στήλη, και βελτιώνει το χρόνο ζωής του διατρητικού εξοπλισμού. Στη διαδικασία ανατίναξης υπάρχει καλύτερος έλεγχος θρυμματισμού, καλύτερος έλεγχος ορόφου δαπέδου, και μειώνεται ο κίνδυνος εκτόξευσης τεμαχίων πετρώματος και οι δονήσεις. Κατά την δευτερογενή θραύση έχουμε μείωση του μεγέθους των όγκων του πετρώματος, όποτε βελτιώνεται η ικανότητα φόρτωσης, και υπάρχει υψηλότερη ικανότητα θραύσης.

Το στήσιμο του μηχανήματος και το κατάπιασμα είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες στον καθορισμό της ακρίβειας των διατρημάτων. Αποτελεί λοιπόν ευθύνη του χειριστή να εξασφαλίσει ότι τα διατρήματα είναι στη σωστή γωνία, θέση και στο απαραίτητο βάθος. Συνήθη λάθη που γίνονται κατά τη διαδικασία διάτρησης είναι:

α) η λανθασμένη θέση καταπιάσματος, β) η λανθασμένη γωνία διάτρησης, που οδηγεί σε δημιουργία διαφοράς στο βάθος των διατρημάτων Σχήμα 1-4(4), και γ) η απόκλιση των διατρημάτων δημιουργείται συνήθως από την ανομοιογένεια του πετρώματος και προκαλείται από τα χαλαρά κομμάτια ή/και την υψηλή τροφοδοσία και πίεση.

Στο Σχήμα 1-4, στην πρώτη σειρά διατρημάτων, λόγω της απόκλισης των διατρημάτων προκαλείται πάρα πολύ μικρό φορτίο, έτσι αναμένεται να δημιουργηθεί το φαινόμενο εκτόξευσης τεμαχίων πετρώματος από το κατώτατο σημείο. Στη δεύτερη σειρά τα διατρήματα παρεκκλίνουν προς το εσωτερικό προκαλώντας ένα πάρα πολύ μεγάλο φορτίο στα μπροστινά διατρήματα. Κατά συνέπεια αναμένεται ότι το κάτω μέρος δεν θα ανατινάξει επιτυχώς. Στην τρίτη σειρά τα διατρήματα παρεκκλίνουν εξωτερικά και το κατώτατο σημείο έρχεται πολύ κοντά στα διατρήματα της δεύτερης σειράς. Κατά συνέπεια υπάρχει κίνδυνος για αστοχία στην ανατίναξη.



**Σχήμα 1- 4:** Προβληματικές διατρήσεις

Συμπερασματικά η βελτίωση της διαδικασίας διάτρησης παρέχει :

- καλύτερη διάτρηση, αύξηση φορτίου και απόστασης μεταξύ των διατρημάτων,
- καλύτερη παραγωγικότητα και λιγότερα προβλήματα με τις διατρητικές στήλες,
- ομαλότερα πρηνή.
- ομαλότερο δάπεδο παταριού,
- μεγαλύτερη ασφάλεια και λιγότερες δονήσεις,
- καλύτερο θρυμματισμό,
- μικρότερο αριθμό μεγάλων όγκων πετρώματος προς διαχείριση, και
- υψηλότερη παραγωγικότητα στη διαδικασία θρυμματισμού

### 1.6.3 Εκρηκτικές ύλες

#### 1.6.3.1 Ορισμός

Ως εκρηκτικές ύλες ορίζονται υγρές ή στερεές ουσίες που με κατάλληλη χημική ή μηχανική διέγερση μπορεί να υποστούν τέτοια χημική μεταβολή που σε ελάχιστο χρόνο να παραχθούν μεγάλες ποσότητες αερίων μαζών με συνθήκες υψηλών

θερμοκρασιών και πιέσεων που μπορούν να εξασκήσουν μια ισχυρή δυναμική καταπόνηση στο περιβάλλον. Όπως φαίνεται από τον ορισμό, οι αέριες ουσίες που σε μείγματα με τον αέρα μπορεί να προκαλέσουν έκρηξη δεν αποτελούν εκρηκτικές ύλες. Οι εκρηκτικές ύλες μπορεί να είναι καθαρές χημικές ενώσεις είτε μείγματα. Αποτελούν το βασικό υλικό γόμωσης των διατρημάτων στις πυροδοτήσεις.

#### 1.6.3.2 Συνήθεις εκρηκτικές ύλες

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες εκρηκτικές ουσίες είναι: 1) η μαύρη πυρίτιδα που αποτελεί μείγμα  $\text{KNO}_3$ , C, S και χρησιμοποιείται κυρίως στη βραδύκαυστη θρυαλίδα, 2) η άκαπνη πυρίτιδα που είναι νιτροκυτταρίνη και χρησιμοποιείται ως προωθητικό και στα φυσίγγια κυνηγίου και σκοποβολής. 3) οι δυναμίτες που αποτελούν μείγματα νιτρογλυκερίνης με άλλες ουσίες και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στον εξορυκτικό τομέα σε διανοίξεις κ.λπ. 4) η τρινιτροτολουόλη (TNT), που είναι ισχυρή εκρηκτική ύλη και χρησιμοποιείται κυρίως για πολεμικούς σκοπούς ως γόμωση. 5) ο νιτρικός πενταερυθρίτης (PETN), που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ακαριαίας θρυαλίδας. 6) ο βροντώδης υδράργυρος και στυφνικός μόλυβδος που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καψυλίων και εναυσματικών μέσων. 7) η ANFO που αποτελεί μείγμα νιτρικού αμμωνίου με πετρέλαιο 5%, και που αποτελεί ευρύτατα χρησιμοποιούμενη εκρηκτική ύλη λόγω της ασφάλειας, του χαμηλού της κόστους, και της ευκολίας παραγωγής της.

Άλλες εκρηκτικές ύλες είναι τα SLURIES, που είναι μείγματα  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  με νερό και άλλες εκρηκτικές ουσίες, τα μείγματα χλωρικών αλάτων με άλλες ουσίες κ.λπ. Οι εκρηκτικές ύλες που παράγονται στην Ελλάδα στα εργοστάσια της ΕΛΒΙΕΜΕΚ, ΠΥΡΚΑΛ, ΕΒΟ, ΦΙΛΝΟΜΠΕΛ είναι η νιτρογλυκερίνη, η ANFO, η μαύρη πυρίτιδα, η ακαριαία θρυαλίδα, οι δυναμίτες κ.λπ. Μαύρη πυρίτιδα παράγεται και στους εναπομείναντες δύο με τρεις παραδοσιακούς μπαρουτόμυλους στη Δημητσάνα.

#### **1.6.4 Δονήσεις και όργανα μέτρησης δονήσεων, που προέρχονται από πυροδοτήσεις και οι κινήσεις των σωματιδίων του εδάφους**

##### *1.6.4.1 Η εδαφική δόνηση ή εδαφική ταλάντωση*

Οι δονήσεις του εδάφους είναι κατά κύριο λόγο οι δονήσεις από πυροδοτήσεις. Σχεδόν πάντοτε γίνονται αντιληπτές. Τα στοιχεία και χαρακτηριστικά (μετρήσιμα) μεγέθη που διακρίνονται στην εδαφική δόνηση, είναι τα εξής :

##### **α) Ταχύτητα**

- Είναι η ταχύτητα με την οποία τα σωματίδια στη θέση μέτρησης (θέση εγκατάστασης γεωφώνου δονησιογράφου) ταλαντώνονται περί τη θέση ισορροπίας τους. Η ταχύτητα ταλάντωσης και ταχύτητα δόνησης, χρησιμοποιούνται ως ταυτόσημοι όροι. Συμπίπτουν επίσης με τον όρο «σωματιδιακή ταχύτητα».
- Είναι ο μέγιστος ρυθμός μετατόπισης των σωματιδίων του εδάφους, αποτελεί την μέγιστη ταχύτητα, γνωστή και ως PPV (Peak Particle Velocity) ή  $U_{max}$ , που χρησιμοποιείται και ως χαρακτηριστικό μέγεθος για την διερεύνηση της πιθανότητας πρόκλησης ζημιών. Η ταχύτητα δόνησης, συνήθως καταγράφεται και αναφέρεται στον ελλαδικό χώρο σε mm/s (χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο).

##### **β) Συχνότητα**

Η συχνότητα δηλώνει πόσες φορές το σωματίδιο εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση στη μονάδα του χρόνου. Έναι ο αριθμός των ταλαντώσεων του σωματιδίου που υπόκειται σε εδαφική δόνηση, και μετράται και αναφέρεται σε πλήρεις κύκλους ανά δευτερόλεπτο ή Hertz (HZ). Για παράδειγμα Συχνότητα 30 HZ σημαίνει ότι, εάν η δόνηση διάρκεια 1 δευτερόλεπτο, το σωματίδιο στη θέση μέτρησης συμπλήρωσε ένα πλήρη κύκλο ταλάντωσης 30 φορές. Η σημασία της συχνότητας στην ανάλυση και αξιολόγηση δονήσεων από ανατινάξεις είναι μεγάλη. Ο λόγος είναι ότι οι κατασκευές ανταποκρίνονται με διαφορετικό τρόπο σε δονήσεις διαφορετικών περιοχών συχνοτήτων.

##### **γ) Μετατόπιση (mm)**

##### **δ) Επιτάχυνση (g)**

Η ταχύτητα ταλάντωσης (PPV) αποτελεί ένα μετρήσιμο φυσικό μέγεθος, και με ειδικά όργανα, τους δονησιογράφους μπορούν να καταγραφούν οι προκαλούμενες δονήσεις από πυροδοτήσεις, συλλέγοντας πρωτογενή καταγραφικά δεδομένα για την ταχύτητα στις τρεις συνιστώσες της (εγκάρσια - Tran, κατακόρυφη-Vert και διαμήκης - Long).

Δύο είναι οι βασικές παραμετροί μιας πυροδότησης, που ελέγχουν και καθορίζουν την ένταση (μέγιστη τιμή ταχύτητας) των προκαλουμένων δονήσεων:

- η απόσταση της θέσης μέτρησης από την πηγή έκρηξης και
- η ποσότητα γόμωσης (εκρηκτικών) ανά χρόνο επιβράδυνσης (kg/delay)

#### *1.6.4.2 Τα όργανα μέτρησης δονήσεων προερχομένων από πυροδοτήσεις και οι κινήσεις των σωματιδίων του εδάφους*

Για την μέτρηση της ταχύτητας καθώς και της συχνότητας δονήσεως χρησιμοποιούνται ειδικά ευαίσθητα όργανα, οι δονησιογράφοι.

Ένας δονησιογράφος αποτελείται από ένα τριαξωνικό γεώφωνο για την μέτρηση των τριών συνιστωσών της ταχύτητας, ένα μικρόφωνο για την μέτρηση της πίεσης του ωστικού κύματος στον αέρα, έναν ενισχυτή του σήματος, έναν μικρουπολογιστή για την αποθήκευση και επεξεργασία των καταγραφικών δεδομένων, και έναν ενσωματωμένο εκτυπωτή για την άμεση εκτύπωση των καταγραφών.



**Σχήμα 1-5 : Δονησιονγράφοι του οίκου Geosonics Inc. SSU Micro-Seismograph και SSU 2000DK, αμερικανικής προέλευσης**





**Σχήμα 1-5 : Δονησιογράφος του οίκου Slope Indicator S-7, αμερικανικής προέλευσης**

Ένας σύγχρονος δονησιογράφος καταγράφει τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του εδάφους σε συνάρτηση με το χρόνο και μετρά το ωστικό κύμα του αέρα με την χρήση ειδικών μικροφώνων που συνδέονται σε αυτόν. Υπολογίζει την μέγιστη τιμή της συνισταμένης των τριών συνιστωσών της ταχύτητας, την μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης, καθώς και την μέγιστη τιμή της μετατόπισης.

### **1.6.5 Ανηγμένη απόσταση (Scaled Distance)**

#### *1.6.5.1 Ορισμός*

Ως Scaled Distance ή ανηγμένη απόσταση, ορίζεται η σχέση:

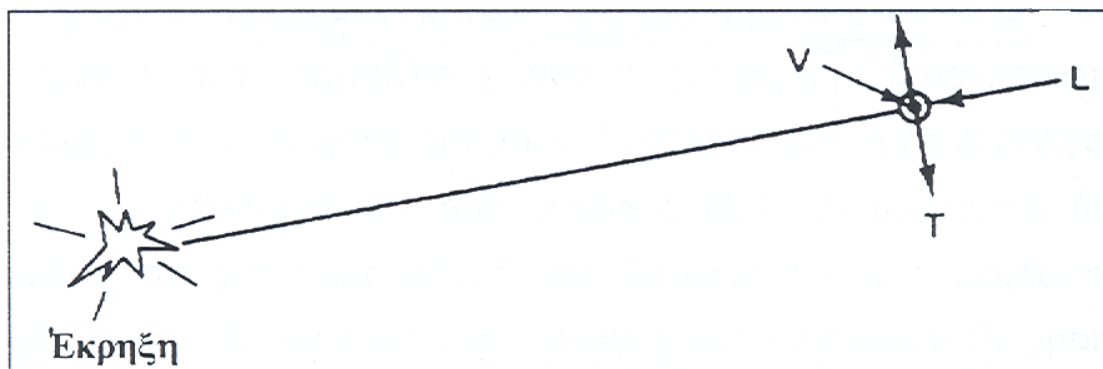
$$SD = \frac{D}{W^r},$$

όπου

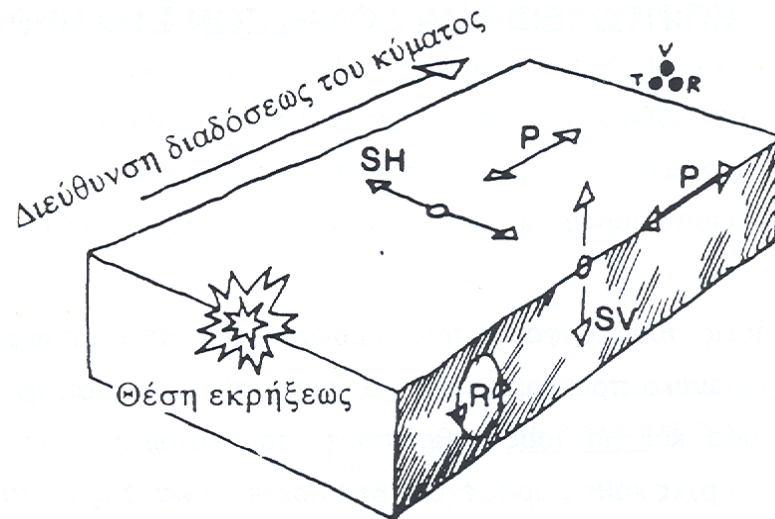
D= είναι η απόσταση της γόμωσης από την κατασκευή που ελέγχεται ή εξετάζεται,  
W= είναι η μέγιστη ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά χρόνο απιβράδυνσης, και  
 $r = 1/2$  ή  $1/3$  ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται (το  $1/2$  είναι πιο γνωστό και καθιερωμένο για επιφανειακές πυροδοτήσεις).

### 1.6.5.2 Τι προκύπτει και πως αξιοποιείται ένα διάγραμμα Scales Distance

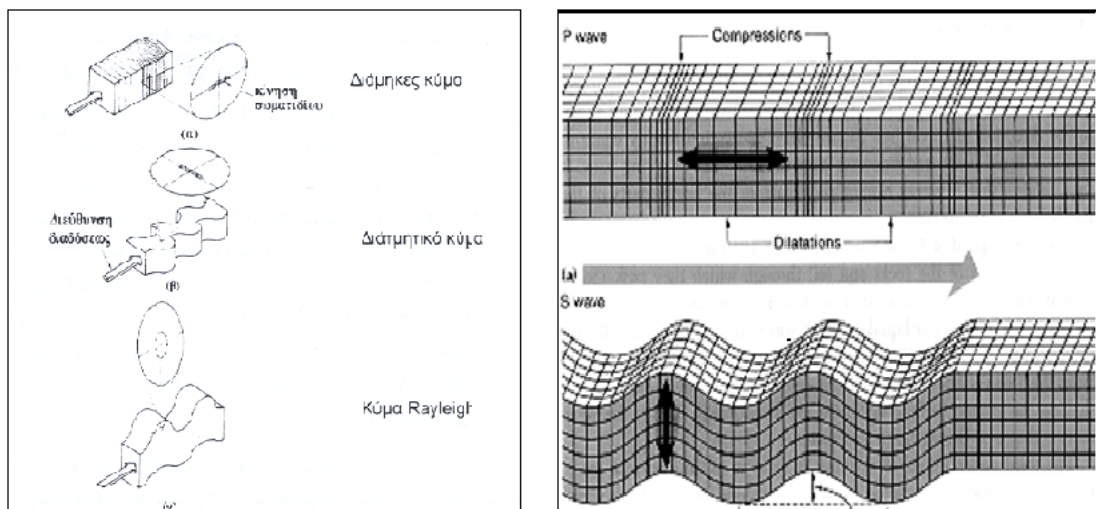
Το πολύ σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από ένα (αξιόπιστο) διάγραμμα Scaled Distance είναι η μαθηματική σχέση (μοντέλο) που συνδέει την μέγιστη ταχύτητα δόνησης  $U_{max}$ , με την απόσταση  $D$  της ανατίναξης από το σημείο μέτρησης ή θέση αναφοράς, και με την ποσότητα εκρηκτικών ανά χρόνο επιβράδυνσης  $W$ . Έτσι, συσχετίζονται με σχετικά απλό τρόπο, οι επιπτώσεις (που προκαλούνται από δονήσεις, ως  $U_{max}$ ), με τη θέση της ανατίναξης (απόσταση) και τη σημαντικότερη παράμετρο σχεδιασμού-εφαρμογής της, την γόμωση ανά χρόνο επιβράδυνσης. Δικαιολογημένα λοιπόν, η σχέση Scaled Distance, αποτελεί την «δονημετρική ταυτότητα» της περιοχής ανατινάξεων-μετρήσεων. Πρακτικά, εξασφαλίζει μία εύχρηστη υπολογιστική βάση, ικανή να δίνει γρήγορες και αξιόπιστες απαντήσεις σε εναλλακτικά σενάρια σχεδιασμού πυροδοτήσεων ή σε βασικά ερωτήματα, όπως για παράδειγμα: 1) Ποιά είναι η «επιτρεπόμενη» γόμωση ανά χρόνο επιβράδυνσης μιας σχεδιασμένης ανατίναξης, έτσι ώστε δεδομένης της απόστασης της από τον αγωγό η αναμενόμενη ταχύτητα δόνησης  $U_{max}$  να μην υπερβεί την επιτρεπόμενη τιμή. 2) Ποιά είναι η αναμενόμενη ταχύτητα δόνησης  $U_{max}$  μιας σχεδιασμένης ανατίναξης, όταν για αυτήν είναι δεδομένη η γόμωση ανά χρόνο επιβράδυνσης και η απόσταση της από το σημείο μέτρησης ή αναφοράς.



**Σχήμα 1-7: Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας που καταγράφει ο δονησιογράφος**



**Σχήμα 1-8 :** Η διεύθυνση διάδοσης και η μορφή των κυμάτων που παράγονται από πυροδότηση



**Σχήμα 1-9 :** Η κίνηση των σωματιδίων του εδάφους κατά την διέλευση διαφορετικών τύπων κυμάτων. (α) διάμηκες θλιπτικό (β) διατμητικό κύμα (γ) κύμα Rayleigh



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΔΑΦΟΣ

## 2.1 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία του Esparza, et al., (1981), για τον προσδιορισμό της μέγιστης ταχύτητας  $U$  ενός υλικού σωματιδίου του εδάφους και της μέγιστης ακτινικής μετατόπισης  $X$ , που προκαλούνται από πυροδοτήσεις εκρηκτικών σημειακής πηγής μέσα σε ένα ομοιογενές έδαφος. Οι ποσότητες αυτές είναι αναγκαίες, επειδή οι δονήσεις του εδάφους εισάγουν τις δυνάμεις που ασκούνται από εκρήξεις πάνω σε έναν αγωγό μεταφοράς, που βρίσκεται τοποθετημένος στο έδαφος. Επιπρόσθετα, πολλοί κανονισμοί που έχουν θεσπιστεί σε διάφορες χώρες για να ελέγχουν τις εκρήξεις κοντά σε αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, στηρίζονται στο κριτήριο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, κοντά σε αγωγούς. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι παραμορφώσεις του αγωγού, και με βάση αυτές οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτόν.

### 2.1.1 Οι πρώτες προσεγγίσεις της απόκρισης του εδάφους από δυναμικά φορτία εκρήξεων

Στο παρελθόν, για την ανάπτυξη των εξισώσεων που περιγράφουν την διάδοση των δονήσεων στο έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις που να συσχετίζουν το βάρος της γόμωσης, με την απόσταση μεταξύ αγωγού και σημειακής

πηγής, καθώς και με την εδαφική μετατόπιση. Η πρώτη προσέγγιση, υιοθετεί ένα νόμο συσχέτισης των παραπάνω ποσοτήτων της μορφής:

$$G = CW^{\beta_1} R^{\beta_2}, \quad (2.1)$$

όπου

$G$  = η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ή της μετατόπισης,

$\beta_1, \beta_2, C$  = σταθεροί συντελεστές,

$W$  = το βάρος της γόμωσης,

$R$  = η απόσταση μεταξύ αγωγού και γόμωσης.

Η αδυναμία της προσέγγισης αυτής είναι ότι η μορφή αυτή δε παίρνει υπ' όψιν της την φυσική πραγματικότητα, και οδηγεί σε εξισώσεις μη συμβατές με τις μονάδες. Επίσης, παράμετροι για την διάδοση των εδαφικών δονήσεων, όπως είναι οι ιδιότητες του εδάφους, αγνοούνται. Έτσι, επειδή αυτές οι παράμετροι αγνοούνται, ο ορισμός του προβλήματος είναι ελλιπής, και τα αποτελέσματα δεν αντιπροσωπεύουν μια αποδεκτή λύση.

Στην δεύτερη προσέγγιση, οι εκφράσεις της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας  $U$  και της εδαφικής μετατόπισης  $X$ , θεωρούνται στη μορφή:

$$Ua\left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{\beta_U} \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{X}{W^{1/3}}\right)a\left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{\beta_X}, \quad (2.3)$$

όπου το σύμβολο  $a$  σημείνει “έκφραση των”.

Η προσέγγιση αυτή είναι μία επέκταση στο έδαφος του νόμου των κυμάτων (Hopkinson (1915), και Granz, (1926)) που προέρχονται από εκρήξεις στον αέρα.

### 2.1.2 Η προσέγγιση των Esparza, et al.

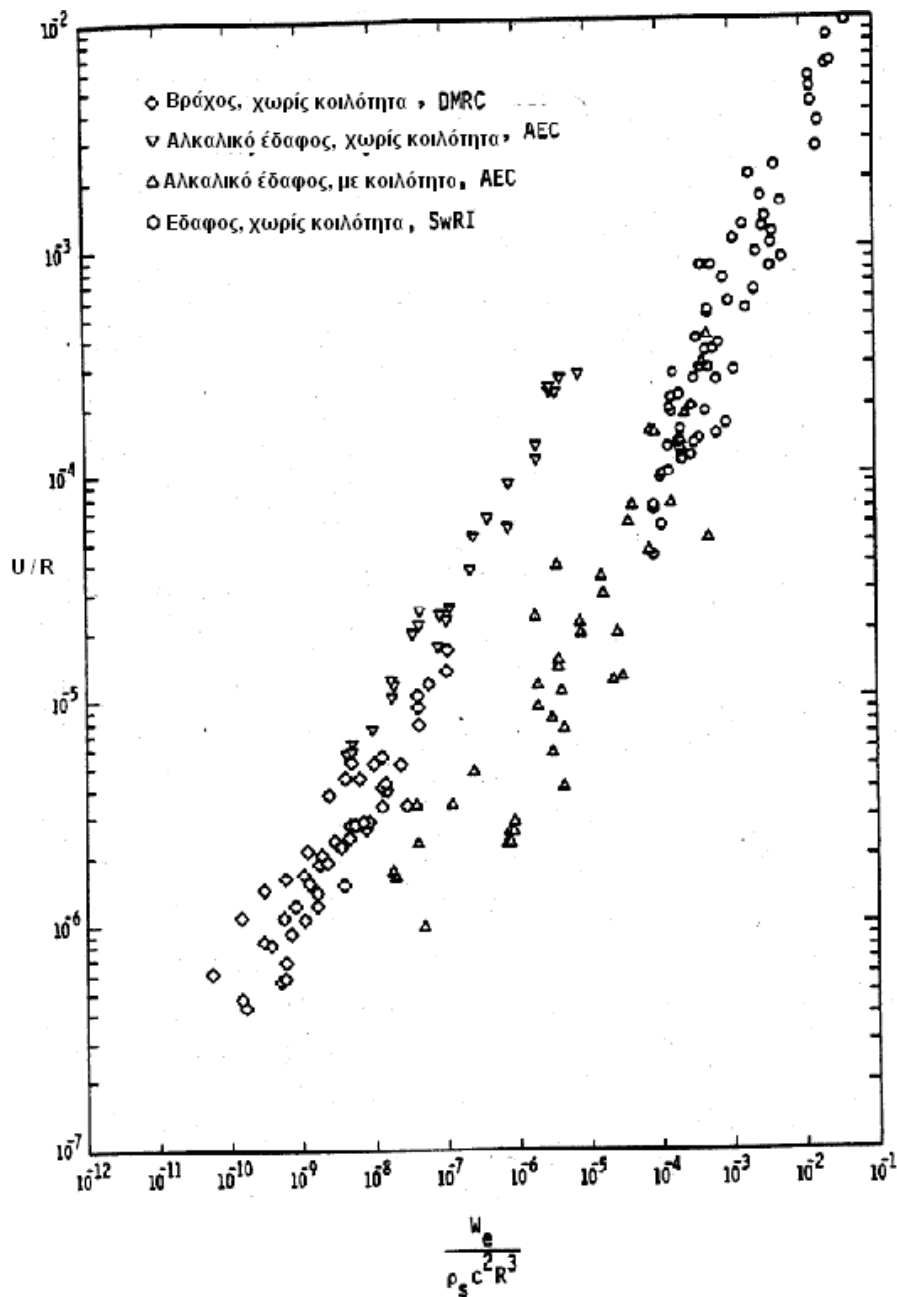
Αν μαζί με τις μεταβλητές  $W$  (βάρος γόμωσης),  $X$  (μετατόπιση),  $U$  (ταχύτητα), συμπεριληφθούν οι παράμετροι  $\rho$  (εδαφική πυκνότητα) και  $c$  (ταχύτητα διάδοσης του κύματος) τότε, με την μέθοδο της διαστατικής ανάλυσης, που είναι γνωστή διεθνώς ως μέθοδος  $pi$  ( $\pi$ ), απαιτούνται δυο αδιάστατοι όροι  $pi$  που αντιστοιχούν στην μετατόπιση ή στην ταχύτητα, και έχουν τις ακόλουθες συναρτησιακές μορφές :

$$\frac{X}{R} = f_x \left( \frac{W_e}{\rho c^2 R^3} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{U}{c} = f_u \left( \frac{W_e}{\rho c^2 R^3} \right) \quad (2.5)$$

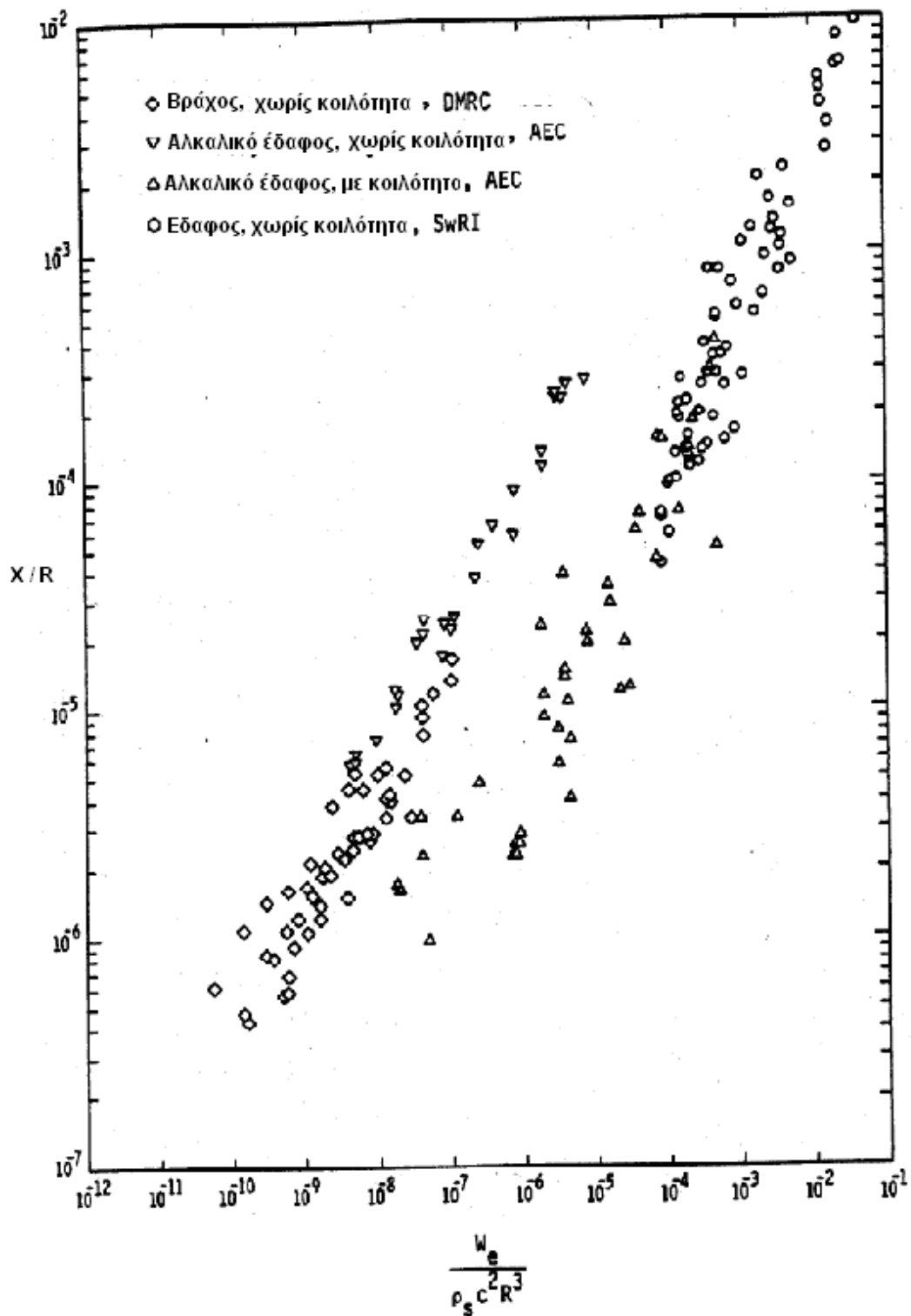
Για τη επιβεβαίωση των παραπάνω σχέσεων, στα Σχήματα 2-1 και 2-2 απεικονίζονται οι τιμές της εδαφικής μετατόπισης και της ταχύτητας σε αδιάστατη μορφή που έχουν προκύψει από ένα μικρό αριθμό πειραμάτων. Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται απο δυο μόνο πηγές: τα πειράματα του Murphey (1961) σε αργιλικά εδάφη, και τα πειράματα που έγιναν από την SwRI. Από τον Murphey περιγράφονται δυο είδη πειραμάτων σε αλκαλικό έδαφος, "Cowboy". Σε αυτά χρησιμοποιήθηκαν γομώσεις των 200 lb, 500 lb και 1000 lb. Στο πρώτο δείγμα των πειραμάτων, το έδαφος ήταν σε επαφή με την γόμωση που εκρήγνεται. Στο δεύτερο δείγμα των πειραμάτων, μεταξύ του εδάφους και της γόμωσης βρίσκονται κοιλότητες με ακτίνα από 1.83 m έως 4.57 m. Τα πειράματα που διεξήχθησαν από την SwRI ήταν σε αργιλώδη εδάφη με διάφορες τιμές υγρασίας. Οι γομώσεις κυμαίνονταν από 0.03 lb έως 1.00 lb. Παρόλο που στο Σχήμα 2-1 θα μπορούσαν να δειχθούν περισσότερα δεδομένα, φαίνεται ότι δεν μπορεί να υπάρξει καμιά συσχέτιση. Κάποια στοιχεία που δείχνονται στο Σχήμα 2-1, δεν είναι συμβατά με την εξίσωση (2.4). Το ίδιο προέκυψε και στην περίπτωση της μέγιστης ταχύτητας, που δείχνεται στο Σχήμα 2-2. Στο σχήμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν και πρόσθετα δεδομένα, εκτός αυτών για την μετατόπιση. Τα διαγράμματα 2-1 και 2-2 δείχνουν ότι οι εδαφικές μετατοπίσεις είναι μικρότερες, για αυτές των πειραμάτων στα οποία υπάρχουν κοιλότητες στα αλκαλικά εδάφη. Επίσης,

δείχνουν ότι οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες σε βράχο από ότι στο έδαφος για ίδιες συνθήκες πυροδότησης. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, στις Εξισώσεις (2.4) και (2.5) πρέπει να προστεθεί ένας επιπλέον όρος συσχέτισης.



Σχήμα 2-1: Η ταχύτητα του σωματιδίου του εδάφους στο έδαφος ή στον βράχο





Σχήμα 2-2: Εδαφική μετατόπιση σε βράχο και έδαφος

### 2.1.2. 1 Διόρθωση των συμβατικών μοντέλων προσέγγισης

Στις παραπάνω εξισώσεις στους όρους  $X/R$  και  $U/c$ , προστέθηκε ένας όρος που είναι η αρνητική τετραγωνική ρίζα του  $\left(\frac{\rho c^2}{p_o}\right)$ , όπου το  $p_o$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση, που χρησιμοποιήθηκε για να κάνει αδιάστατο τον όρο. Έτσι, από τις Εξισώσεις (2.4) και (2.5), προκύπτουν οι εξισώσεις :

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = f_x \left( \frac{W_e}{\rho c^2 R^3} \right) \quad (2.6)$$

$$\frac{U}{c} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = f_u \left( \frac{W_e}{\rho c^2 R^3} \right) \quad (2.7)$$

Οι εξισώσεις αυτές αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα, χωρίς τις κοιλότητες, που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 2-1 και 2-2, καθώς και τα δεδομένα από πειράματα στις τοποθεσίες Kansas και Kentucky. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της AEC από πυροδοτήσεις υπόγειων πυρηνικών εκρηκτικών.

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 2-3 και 2-4, παρέχουν τις αδιάστατες τιμές των  $X$ ,  $U$ , και προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.6) και (2.7) αντίστοιχα. Το βάρος των γομώσεων κυμαίνεται από  $0.03lb$  της χημικής εκρηκτικής ύλης ως τη ραδιοχημική παραγωγή των  $38.4 Kt$  στο BLANCA, που είναι ένας συντελεστής άνω των 2 δισεκατομμυρίων. Το εύρος στο έδαφος και τον βράχο είναι μικρό καθώς η φύση προσφέρει μόνο μικρή ποικιλία. Το εύρος όμως της  $c$  είναι προσεγγιστικά από  $152.4 m/s$  έως  $4572 m/s$ , δηλαδή ένα εύρος των 30 μονάδων. Για τα δεδομένα του εδάφους που μετρήθηκαν σε αυτό το πρόγραμμα οι αποστάσεις ήταν αρκετά κοντύτερα στις γομώσεις από ότι για άλλα αποτελέσματα.

### 2.1.2. 2 Ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις

Με βάση μια εκτεταμένη συλλογή δεδομένων από την βιβλιογραφία, οι Esparza, et al., (1981), ανέπτυξαν εμπειρικές σχέσεις για την πρόβλεψη της μέγιστης ακτινικής εδαφικής μετατόπισης και της εδαφικής ταχύτητας ταλάντωσης, όταν πυροδοτούνται εκρηκτικές γομώσεις που είναι θαμμένες σε ένα ομοιογενές εδαφικό υλικό. Οι σχέσεις αυτές έχουν την μορφή:

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = \frac{0.0414 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{1.11}}{\tanh^{1.5} \left[ 18.2 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.237} \right]}, \text{ και} \quad (2.8)$$

$$\frac{U}{c} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right) = \frac{0.00617 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.852}}{\tanh \left[ 26.0 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.30} \right]}, \quad (2.9)$$

όπου:

$X$  = είναι η μέγιστη ακτινική εδαφική μετατόπιση σε  $ft$ ,

$U$  = είναι η μέγιστη ταχύτητα υλικού σωματιδίου του εδάφους σε  $ft/sec^2$ ,

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ αγωγού και σημειακής πηγής σε  $ft$ ,

$w_e$  = είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την έκρηξη σε  $lb-ft$ ,

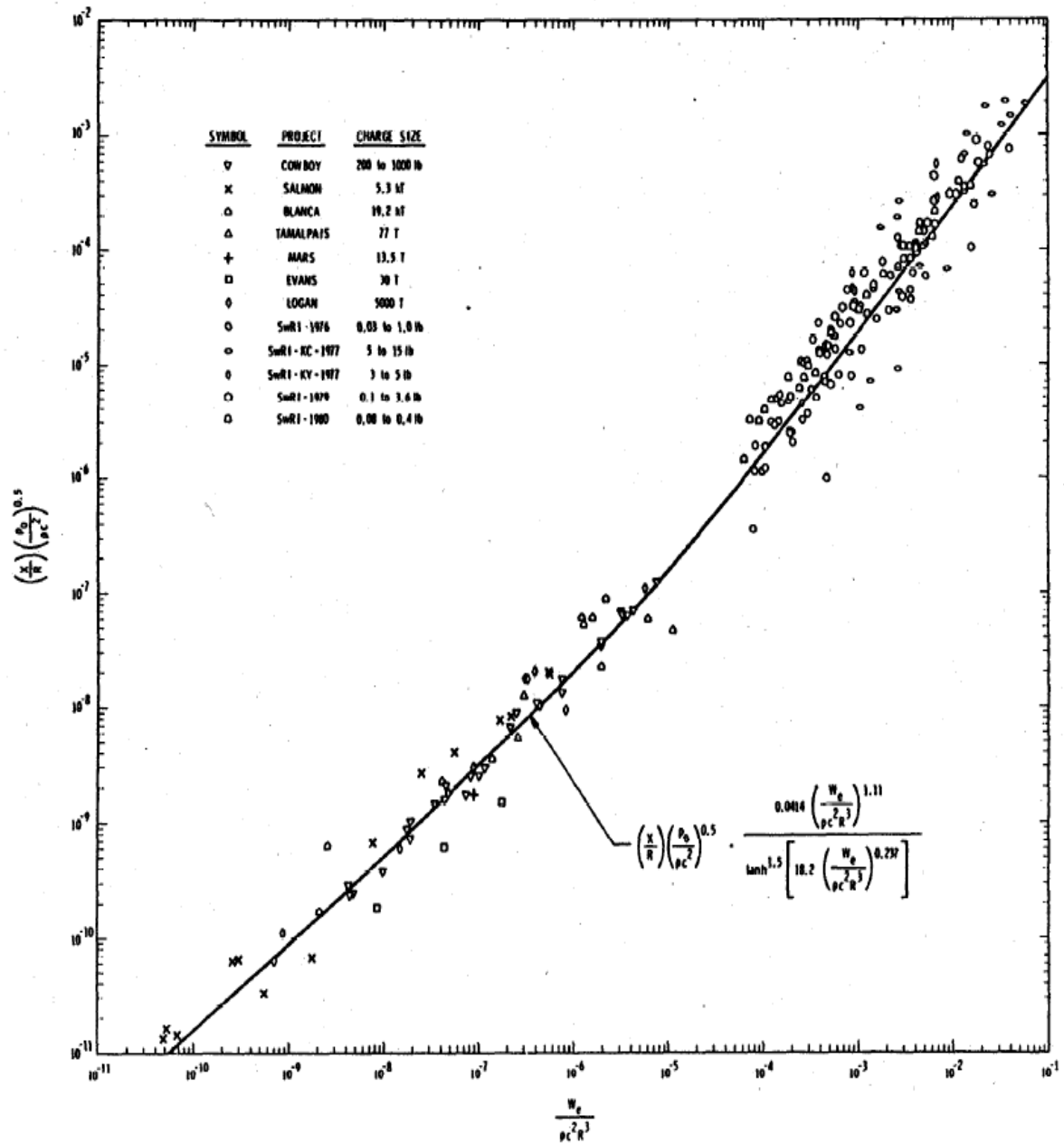
$\rho$  = είναι η πυκνότητα του εδαφικού υλικού σε  $lb-sec^2 / ft^4$ ,

$c$  = είναι η ταχύτητα των σεισμικών P -κυμάτων στο έδαφος, και

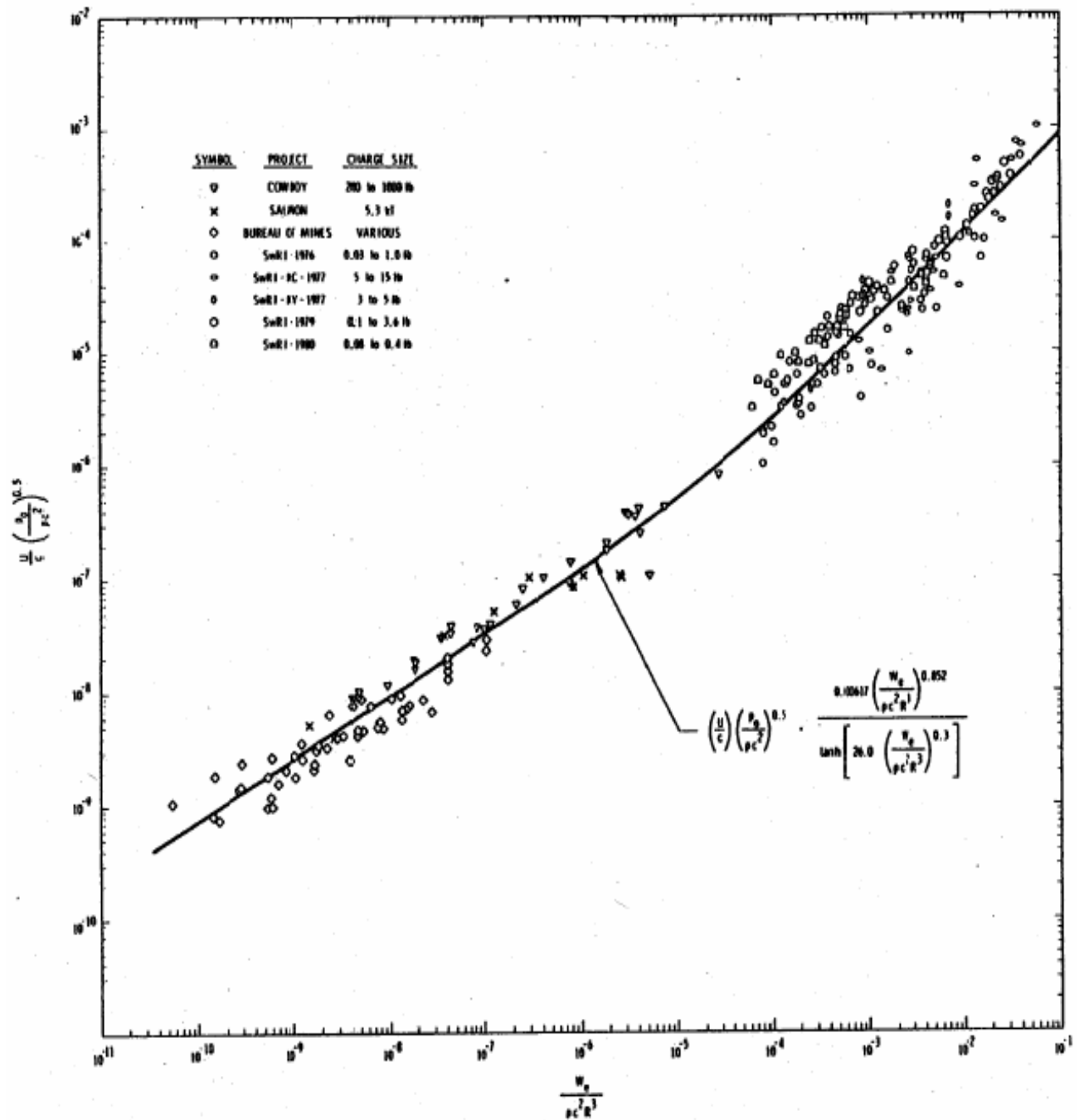
$p_o$  = είναι η ατμοσφαιρική πίεση ( $lb/ft^2$ ).

Οι εξισώσεις αυτές, μπορούν να προσαρμοστούν και σε άλλο σύστημα μονάδων, επειδή οι μεταβλητές των εξισώσεων αυτών έχουν εισαχθεί σε αδιάστατη μορφή.

Οι συνεχείς καμπύλες για σημειακή πηγή έκρηξης, που ορίζονται από τις παραπάνω εξισώσεις φαίνονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 2-3 και 2-4. Παρατηρούμε, ότι οι εξισώσεις αυτές ταιριάζουν καλά με τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2-3: Η μετατόπιση του σωματιδίου του εδάφους στο έδαφος και στον βράχο σε σχέση με την καμπύλη της εξίσωσης



Σχήμα 2-4: Η ακτινική ταχύτητα του υλικού σωματιδίου στο βράχο και στο έδαφος σε σχέση με την καμπύλη της εξίσωσης

### 2.1.2. 3 Απλοποιημένες εξισώσεις για τις ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις

Θα πρέπει να τονισθεί ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές που διαφοροποιούν τις παραπάνω εμπειρικές εξισώσεις από προηγούμενες που προβλέπουν τις κινήσεις του εδάφους. Οι νέες εξισώσεις δεν είναι γραμμικές λογαριθμικές, τα αποτελέσματα των δοκιμών καλύπτουν τις περισσότερες τάξεις μεγέθους. Η παρουσία της ατμοσφαιρικής πίεσης στις παραπάνω σχέσεις, δεν σημαίνει ότι η ατμοσφαιρική πίεση αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο που επηρεάζει τα αποτελέσματα. Η ποσότητα  $(\rho c^2)$  αποτελεί ένα μέτρο της συμπιεστότητας του μέσου διάδοσης των ταλαντώσεων. Ως εκ τούτου, η ποσότητα  $p_0$  αποτελεί μια σταθερά αναφοράς και εισάγει με εμπειρικό τρόπο τις σχετικές συμπιεστότητες στα διάφορα υλικά.

Τα στοιχεία των εδαφικών μετατοπίσεων που συλλέχθηκαν από την SwRI, από πειράματα φυσικού μεγέθους, ήταν για τιμές  $(w_e / \rho c^2 R^3)$  μεγαλύτερες από  $6.4 \times 10^{-5}$ . Για το αυτό εύρος της ποσότητας των γομώσεων, που χρησιμοποιούνται, οι γραμμικές-λογαριθμικές καμπύλες ήταν εφαρμόσιμες σε όλα τα στοιχεία της SwRI, για σημειακή πηγή έκρηξης. Οι προκύπτουσες εξισώσεις της ακτινικής εδαφικής μετατόπισης και της ταχύτητας του υλικού σημείου του εδάφους, για σημειακές πηγές έκρηξης είναι:

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.0373 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{1.060}, \quad (2.10)$$

$$\frac{U}{C} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.00489 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.790}, \quad (2.11)$$

όπου  $6 \times 10^{-5} < (w_e / \rho c^2 R^3) < 6 \times 10^{-2}$ .

Όπως συνέβη και με τις γενικές εξισώσεις, κάθε ομάδα παραμέτρων είναι αδιάστατη και επομένως, οι εξισώσεις αυτές, μπορούν να προσαρμοσθούν κατάλληλα σε οποιοδήποτε σύστημα μονάδων. Οι απλοποιημένες αυτές εξισώσεις, όπως και οι

γενικές εξισώσεις παρέχουν τις ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις σε ένα σημείο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε βάθος όσο είναι το βάθος που βρίσκεται το κέντρο του αγωγού. Στις δοκιμές, το βάθος αυτό αντιστοιχούσε συνήθως σε δύο διαμέτρους αγωγών. Οι εξισώσεις αυτές πρέπει να ισχύσουν για ένα λογικό εύρος βαθών μέχρι σχεδόν την επιφάνεια του εδάφους. Οι απλουστευμένες αυτές εξισώσεις δίνουν ουσιαστικά τις ίδιες προβλέψεις για τις ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις με τις γενικότερες εξισώσεις (2.8) και (2.9). Επομένως, οι απλούστερες εξισώσεις (2.10) και (2.11) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των εδαφικών μετατοπίσεων από σημειακές πηγές στο έδαφος μέσα στο εφαρμόσιμο εύρος.

## **2.2 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ**

### **2.2.1 Γενική περιγραφή της διαδικασίας**

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να παρουσιάσει την εξαγωγή των εξισώσεων του Esparza, et al., 1981, για τον υπολογισμό των τάσεων που εισάγονται σε έναν αγωγό μεταφοράς από μια γειτονική έκρηξη. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εξαγωγή των εξισώσεων αυτών είναι ότι, η πηγή φόρτισης θεωρείται ότι είναι μια δυναμική σημειακή φόρτιση, τύπου πλήγματος, και το κύμα που προξενείται στο έδαφος από την πηγή αυτή διαδίδεται με μια ταχύτητα  $U$  στο περιβάλλον της πηγής έδαφος.

Η ανάπτυξη των εξισώσεων στηρίζεται σε μια σειρά βασικών υποθέσεων αναφορικά με το εδαφικό μέσο που διαδίδεται το κύμα, οι βασικότερες των οποίων είναι :

- 1) Το περιβάλλον στην πηγή έδαφος είναι ελαστικό και ομοιογενές άπειρο μέσο. Οι μηχανικές ιδιότητες του ελαστικού αυτού μέσου περιγράφονται μόνο με την εδαφική πυκνότητα του εδαφικού υλικού, και την ταχύτητα διάδοσης  $U$  του ελαστικού κύματος στο μέσο αυτό, που θεωρείται ότι συμπίπτει με την ταχύτητα διάδοσης  $c$  του σεισμικού κύματος.
- 2) Οι γεωμετρικοί παράμετρος που θεωρείται είναι, η απόσταση  $R$  από την σημειακή πηγή. Θεωρείται ότι η απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους από τον θαμμένο αγωγό δεν εξασκεί επίδραση στην μορφή των τάσεων.
- 3) Η πρωτοτυπία της μεθόδου του Esparza, et al., (1981), που είναι ότι δεν εισάγει μια ισοδυναμία στην φόρτιση στην μορφή ενός τύπου πλήγματος δύναμης-χρόνου,

όπως συνήθως γίνεται, αλλά στηρίζεται στις αρχές διατήρησης μάζας και ενέργειας, και σε ορισμένα θεωρητικά αποτελέσματα του μονοδιάστατου δυναμικού προβλήματος, και σε μια σχέση, που συνδέει, σε μια θέση του μέσου, την προκαλούμενη ταχύτητα του υλικού σωματιδίου και την αναπτυσσόμενη πίεση στο μέτωπο διάδοσης του κύματος στο σημείο αυτό.

Στην συνέχεια, για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της μεταβίβασης των δυναμικών τάσεων του εδάφους στον αγωγό, εισάγεται μια παραδοχή για την κατανομή των ωθήσεων γύρω από τον κυκλικό αγωγό. Έτσι, με την παραδοχή αυτή επιτυγχάνεται μια εκτίμηση της κινητικής ενέργειας που αποθηκεύεται στον αγωγό με την μορφή ενέργειας παραμόρφωσης. Για τον υπολογισμό της ακτινικής παραμόρφωσης του αγωγού, γίνεται η υπόθεση της γεωμετρικής παραμόρφωσης της διατομής του αγωγού από την κυκλική μορφή που είναι σε μια οβάλ μορφή. Με την παραδοχή αυτή, επιτυγχάνεται ο θεωρητικός υπολογισμός της ενέργειας παραμόρφωσης σε όρους της εφαπτομενικής τάσης, που είναι υπεύθυνη για την οβάλ παραμορφωμένη μορφή του αγωγού.

Από την διατήρηση της ενέργειας, προσδιορίζεται η εφαπτομενική παραμόρφωση. Ο προσδιορισμός της διαμήκους παραμόρφωσης γίνεται ακολουθώντας μια ανάλογη διαδικασία. Γίνεται η υπόθεση ότι, λόγω της έκρηξης, ο αγωγός υφίσταται μια κάμψη με συνημιτονοειδή μορφή, που παράγει τις διαμήκεις παραμορφώσεις. Έτσι, η ενέργεια παραμόρφωσης λόγω κάμψης του αγωγού μπορεί να υπολογιστεί σε όρους των διαμήκων παραμορφώσεων του αγωγού. Εξισώνοντας την καμπτική ενέργεια παραμόρφωσης του αγωγού με την κινητική ενέργεια, προκύπτει η σχέση που παρέχει τις διαμήκεις παραμορφώσεις.

### **2.2.2 Εκτίμηση της ώθησης που προκαλείται στους αγωγούς**

Για να υπολογιστεί η παραμόρφωση που εισάγεται στον αγωγό από την ταχύτητα του υλικού σωματιδίου, χρησιμοποιηθήκαν οι σχέσεις των Rankine-Hugoniot, που περιγράφουν την διατήρηση της μάζας και της ορμής. Για ένα ακίνητο σύστημα συν-



τεταγμένων με μια μετακίνηση πλήγματος με μια ταχύτητα  $V$ , οι εξισώσεις αυτές είναι:

$$-\rho_s V = \rho_a (U - V) \quad (2.12)$$

$$\rho_s V^2 = p_s + p_a (U - V)^2, \quad (2.13)$$

Όπου  $U$  είναι η ταχύτητα του υλικού σωματιδίου, το  $p_s$  είναι η πυκνότητα του εδάφους μπροστά από το μέτωπο του πλήγματος, και  $p_a$  είναι η πυκνότητα πίσω από το μέτωπο.

Πολλαπλασιάζοντας και τις δύο πλευρές της εξίσωσης (2.12) με  $(U - V)$  και αφαιρώντας τη νέα εξίσωση (2.12) από την εξίσωση (2.13) προκύπτει:

$$p_s = \rho_s V U. \quad (2.14)$$

Σε ένα ασυμπίεστο μέσο, όπως το έδαφος, η ταχύτητα διάδοσης του δόνησης  $V$  κατά την οριζόντια διεύθυνση προσεγγίζει την σεισμική ταχύτητα  $c$ . Οπότε, θέτοντας  $V=c$  στην (2.14), προκύπτει:

$$p_s = \rho_s c U. \quad (2.15)$$

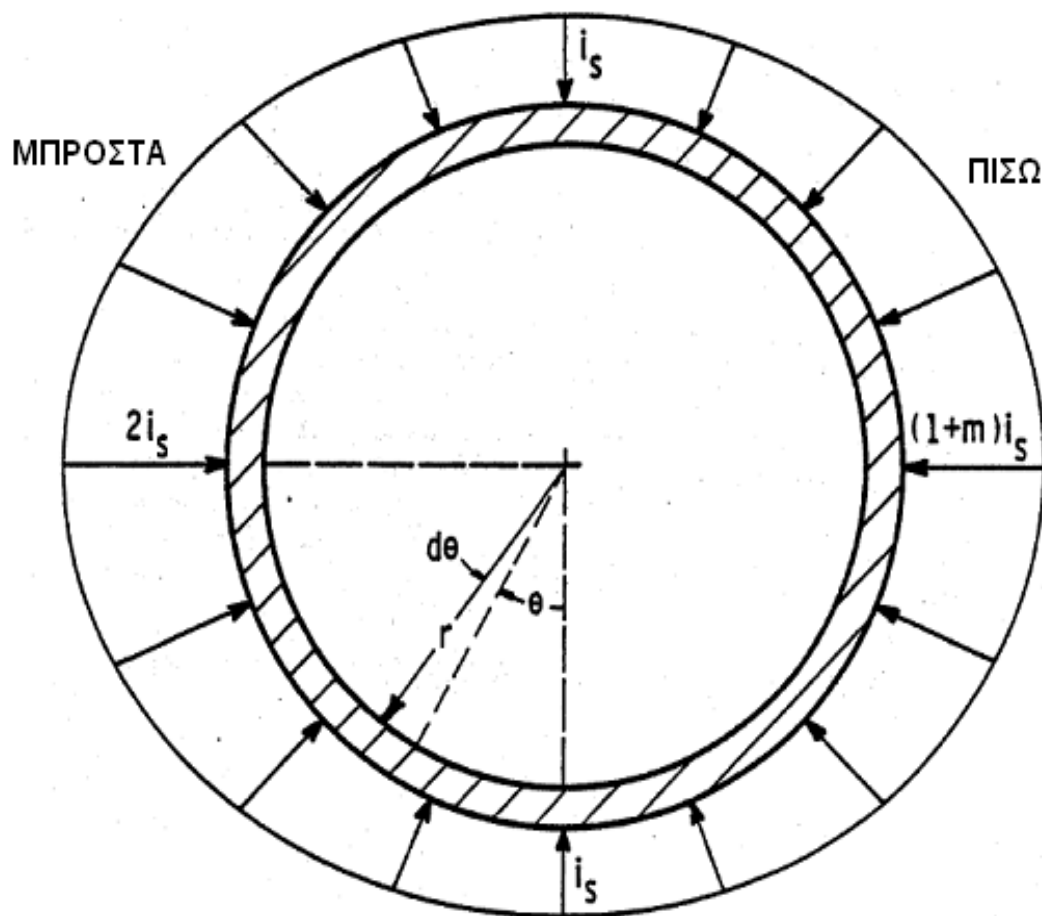
Επειδή το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο είναι η ώθηση, ολοκληρώνοντας την (2.15), προκύπτει:

$$i_s = \int_0^t p_s dt = \rho_s c U. \quad (2.16)$$

Για την ώθηση  $i_s$ , γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει η παρακάτω κατανομή γύρω από τον αγωγό:

$$i = i_s \left( 1 + \frac{2\theta}{\pi} \right), \quad \text{όταν } 0 < \theta < \pi/2, \quad (2.17)$$

$$i = i_s \left( 1 - \frac{2m\theta}{\pi} \right), \text{ όταν } 0 > \theta > -\pi/2. \quad (2.18)$$



Σχήμα 2-5: Η υπόθεση για την διανομή της ώθησης γύρω από τον αγωγό

### 2.2.3 Προσδιορισμός της εφαπτομενικής παραμόρφωσης του αγωγού

Έχοντας προσδιορίσει την ώθηση που υφίσταται ο αγωγός από την έκρηξη, οι παραμορφώσεις του αγωγού μπορούν να υπολογιστούν υποθέτοντας μια παραμορφωμένη μορφή της διατομής και εξισώνοντας την κινητική ενέργεια με την ενέργεια παραμόρφωσης της διατομής.

Η κινητική ενέργεια που μεταβιβάζεται στο αγωγό είναι:

$$KE = \sum_{pipe} \frac{1}{2} M V_o^2 = \sum_{pipe} \frac{M}{2} \left( \frac{i_p A_p}{M} \right)^2 = \sum_{pipe} \frac{i_p^2 A_p^2}{2M} . \quad (2.19)$$

Όπου το  $M$  δηλώνει τη μάζα του αγωγού μαζί με μια μάζα εδάφους. Για την κάμψη μιας διατομής σχήματος δακτυλίου, η θεμελιώδης φυσική συχνότητα  $\omega$  δίνεται από τη σχέση (Den Hartog, 1947):

$$\omega = 2.6833 \sqrt{\frac{EJ}{\mu \tau^4}} , \quad (2.20)$$

όπου

$J = 1/12(dx)h^3$ , είναι η ροπή αδράνειας της διατομής, και

$\mu$  = η μάζα ανά μονάδα μήκους.

Εάν στην εξίσωση (2.20) αντικατασταθεί το  $\mu$  με  $(\rho_s R dx)$ , και υπολογιστεί η περίοδος  $\tau$  από τη συχνότητα  $\omega$  προκύπτει:

$$\tau = 8.11 \sqrt{\frac{\rho_s R r^4}{E h^3}} . \quad (2.21)$$

Στη σχέση αυτή, υπενθυμίζεται ότι το  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα του εδάφους, το  $R$  απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών, το  $r$  είναι η ακτίνα του αγωγού, το  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του αγωγού, και το  $h$  είναι το πάχος του τοιχώματος του αγωγού.

Αν η μάζα  $M$  θεωρηθεί ως μια ισοδύναμη εδαφική μάζα, η κινητική ενέργεια που μεταβιβάζεται στον αγωγό μπορεί να υπολογιστεί με την αντικατάσταση του όρου ( $\rho_s R dx$ ) για τη μάζα ανά μονάδα μήκους της περιφέρειας του αγωγού. Η συνολική ώθηση ( $iAp$ ) στον αριθμητή της εξίσωσης (2.19) δίνεται από το ( $I r d\theta dx$ ). Η μάζα  $M$  στην εξίσωση (2.19) δίνεται από το ( $\rho_s R r d\theta dx$ ). Εκμεταλλευόμενοι την συμμετρία και την ολοκληρώνοντας στο πάνω μισό τμήμα του αγωγού, από την εξίσωση (2.19):

$$KE = 2 \int_{-\ell/2}^{+\ell/2} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{i^2 (rd\theta dx)^2}{2(\rho_s R r d\theta dx)} = \frac{r}{\rho_s R} \int_{-\ell/2}^{+\ell/2} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} i^2 d\theta dx, \quad (2.22)$$

όπου το  $\ell$  είναι ένα αυθαίρετο μήκος του αγωγού. Αλλά το  $i$  δίνεται από τις εξισώσεις (2.17) και (2.18) πράγμα που σημαίνει:

$$KE = \frac{r i_s^2}{\rho_s R} \left[ \int_{-\ell/2}^{+\ell/2} \int_0^{+\pi/2} \left(1 + \frac{2\theta}{\pi}\right)^2 d\theta dx + \int_{-\ell/2}^{+\ell/2} \int_{-\pi/2}^0 \left(1 - \frac{2m\theta}{\pi}\right)^2 d\theta dx \right], \quad (2.23)$$

από όπου

$$KE = \left[ \frac{\pi}{2} \left( 3.333 - m + \frac{m^2}{3} \right) \right] \frac{i_s^2 r \ell}{\rho_s R}. \quad (2.24)$$

Η παραπάνω σχέση παρέχει την κινητική ενέργεια που θα εξισωθεί παρακάτω με την ενέργεια παραμόρφωσης που θα βρεθεί σε ένα οβάλ σχήμα. Για τον προσδιορισμό της ενέργειας παραμόρφωσης, το παραμορφωμένο οβάλ θεωρείται ότι περιγράφεται με την σχέση:

$$y = w_o \cos 2\theta, \quad (2.25)$$

όπου  $w_o$  είναι η μέγιστη παραμόρφωση.

Η ροπή κάμψης  $M_b$ , υπολογίζεται μετά από δύο παραγωγές της εξίσωσης (2.25) είναι:

$$M_b = -EJ \frac{d^2 y}{r^2 d\theta^2} = \frac{4EJw_o}{r^2} \cos 2\theta . \quad (2.26)$$

Η ενέργεια παραμόρφωσης ( $SE_{cir}$ ) του δακτυλίου παρέχεται από την γνωστή σχέση της αντοχής υλικών:

$$SE_{cir} = 8 \int_0^{\pi/4} \frac{M_b^2 r d\theta}{2EJ} , \quad (2.27)$$

η οποία παίρνοντας υπ' όψη την μετά από την αντικατάσταση της εξίσωσης (2.26) την εξίσωση (2.27), παρέχει:

$$SE_{cir} = \frac{64EJw_o^2}{r^3} \int_0^{\pi/4} \cos^2(2\theta) d\theta, \quad (2.28)$$

και μετά από ολοκλήρωση βρίσκεται ότι:

$$SE_{cir} = \frac{8\pi EJw_o^2}{r^3} . \quad (2.29)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση κάμψης, βρίσκεται η εφαπτομενική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_{cir} = \frac{M_{\max} h/2}{JE} . \quad (2.30)$$

Η εξίσωση (2.26) παρέχει τη μέγιστη τιμή όταν το  $(\cos 2\theta)$  είναι ίσο με την μονάδα, και λύνοντας ως προς  $w_o$  δίνει:

$$w_o = \frac{\varepsilon_{cir} r^2}{2h} . \quad (2.31)$$

Η δεύτερη ροπή αδράνειας  $J$  γύρω από έναν άξονα που διέρχεται το τοίχωμα του αγωγού δίνεται από:

(2.32)

όπου  $l$  είναι ένα αυθαίρετο μήκος του αγωγού. Στη συνέχεια, η αντικατάσταση των εξισώσεων (2.31) και (2.32) στην εξίσωση (2.29), δίνει την εφαπτομενική ενέργεια παραμόρφωσης:

$$SE_{cir} = \frac{\pi}{6} \varepsilon_{cir}^2 E r h \ell . \quad (2.33)$$

Τελικά, η εξισώνοντας την ενέργεια παραμόρφωσης  $SE$ , με την κινητική ενέργεια  $KE$ , που δίνεται από την εξίσωση (2.24), προκύπτει:

$$\frac{\pi}{6} \varepsilon_{cir}^2 E r h \ell = \left[ \frac{\pi}{2} \left( 3.333 - m + \frac{m^2}{3} \right) \right] \frac{i_s^2 r \ell}{\rho_s R} \quad (2.34)$$

από όπου,

$$\varepsilon_{cir} = \left[ 10 - 3m + m^2 \right]^{1/2} \frac{i_s}{[E h R \rho_s]^{1/2}} . \quad (2.35)$$

Όμως, η πλευρική ώθηση στον αγωγό  $i_s$  σχετίζεται με τη μετατόπιση από την εξίσωση (2.18). Αντικαθιστώντας για την (2.18) στην (2.35) το  $i_s$ , βρίσκεται:

$$\varepsilon_{cir} = \left[ 10 - 3m + m^2 \right]^{1/2} \frac{\rho^{1/2} c X}{[E^{1/2} h^{1/2} R^{1/2}]^{1/2}} . \quad (2.36)$$

Η ποσότητα  $[10 - 3m + m^2]^{0.5}$  είναι ένας συντελεστής διάθλασης, που συμβολίζεται με  $C_c$ . Η τελική μορφή της εξίσωσης (2.36), που θα χρησιμοποιηθεί για να αναπτυχθεί η τελική εμπειρική λύση είναι:

$$\varepsilon_{cir} = C_c \frac{\rho^{1/2} cX}{E^{1/2} h^{1/2} R^{1/2}} . \quad (2.37)$$

Το πλεονέκτημα της εξίσωσης (2.37), με την μορφή αυτή είναι ότι η παραμόρφωση εξαρτάται από την μετατόπιση του εδάφους  $X$ .

#### 2.2.4 Προσδιορισμός των διαμήκων παραμορφώσεων του αγωγού

Οι διαμήκεις παραμορφώσεις αναπτύσσονται από την κάμψη του αγωγού. Για αυτό ο αγωγός πρέπει να αντιμετωπιστεί ως μια δοκός μεγάλου μήκους. Για ένα διαφορικό μήκος  $dx$  του αγωγού, η συνισταμένη ώθηση είναι:

$$\frac{I}{dx} = 2 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} i \sin \theta r d\theta . \quad (2.38)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.38) τις (2.17) και (2.18), προκύπτει:

$$\frac{I}{dx} = 2ri \left[ \int_{-\pi/2}^0 \left( 1 - \frac{2m\theta}{\pi} \right) \sin \theta d\theta + \int_0^{+\pi/2} \left( 1 + \frac{2\theta}{\pi} \right) \sin \theta d\theta \right]. \quad (2.39)$$

Με τη σχετική ολοκλήρωση προκύπτει:

$$I = \frac{4}{\pi} (1 - m) i_s r dx. \quad (2.40)$$

Η εξίσωση (2.40) είναι η συνολική ώθηση που μεταδίδεται σε ένα τμήμα του αγωγού με σχήμα δακτυλίου. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$I = C i_s A_p , \quad (2.41)$$

όπου  $A_p = 2r dx$ , είναι το εμβαδόν της προβολής του δακτυλίου στον κατακόρυφο άξονα, και

$C = (2/\pi)(1 - m)$ , είναι ο διαμήκης συντελεστής.

Η κινητική ενέργεια  $KE$  αναφορικά με την κατά μήκος κάμψη του αγωγού δίνεται από:

$$KE = \sum_{pipe} \frac{1}{2} M V_o^2 = \sum_{pipe} \frac{I^2}{2m} = 2 \int_0^{\ell/2} \sum_{pipe} \frac{I^2}{2m}. \quad (2.42)$$

Αντικαθιστώντας το  $I$ , όπως είναι στην εξίσωση (2.41), και υποθέτοντας ότι η μάζα εδάφους κινείται από το κέντρο της γόμωσης προς το κέντρο του αγωγού, προκύπτει :

$$KE = \int_0^{\ell/2} \frac{C^2 i_s^2 (2r)^2 (dx)^2}{\rho_s (2r) R(dx)}. \quad (2.43)$$

Υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα προκύπτει:

$$KE = \frac{C^2 i_s^2 r \ell}{\rho_s R}. \quad (2.44)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.16) στην εξίσωση (2.44) βρίσκεται ότι:

$$KE = \frac{C^2 \rho_s c^2 r \ell X^2}{R}. \quad (2.45)$$

Στην συνέχεια, θα υπολογιστεί η ενέργεια παραμόρφωσης  $SE_{long}$  λόγω της κάμψης κατά μήκος του αγωγού. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται υποθέτοντας μια παραμόρφωση του αγωγού που δίνεται από την σχέση:

$$y = w_o \cos\left(\frac{\pi x}{\ell}\right), \quad (2.46)$$



όπου  $w_o$  = είναι η μέγιστη επιμήκυνση του αγωγού, και

$\ell$  = το συνολικό μήκος του αγωγού.

Παραγωγίζοντας δυο φορές την εξίσωση (2.46) , και αντικαθιστώντας στην εξίσωση την ροπή κάμψης, προκύπτει:

$$M_b = -EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\pi^2 EJ w_o}{\ell^2} \cos 2\theta . \quad (2.47)$$

Όμως, η ενέργεια παραμόρφωσης λόγω κάμψης δίνεται από την σχέση:

$$SE_{long} = 2 \int_0^{\ell/2} \frac{M_b^2 dx}{2EJ} , \quad (2.48)$$

όπου αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.47) στην (2.48) προκύπτει :

$$SE_{long} = \frac{\pi^4 EJ w_o^2}{\ell^4} \int_0^{\ell/2} \cos^2 \left( \frac{\pi x}{\ell} \right) dx . \quad (2.49)$$

Η παραπάνω εξίσωση παρέχει:

$$SE_{long} = \frac{\pi^4 EJ w_o^2}{4\ell^3} . \quad (2.50)$$

Η ροπή αδράνειας  $J$  για τον αγωγό δίνεται από την σχέση:

$$J = \frac{\pi}{4} (r_o^4 - r_i^4) . \quad (2.51)$$

Θέτοντας το  $(ri+h)$  στη θέση του  $ro$ , προκύπτει:

$$J = \frac{\pi r_i^4}{4} \left[ \left( 1 + \frac{h}{r_i} \right)^4 - 1 \right] . \quad (2.52)$$

Χρησιμοποιώντας την πολυωνμική επέκταση της παραπάνω σχέσης και κρατώντας μόνο τους δυο πρώτους όρους, καθώς το  $(h/r_i)$  έχει μικρή τιμή, βρίσκεται:

$$J = \frac{\pi r_i^4}{4} \left[ 1 + 4 \left( \frac{h}{r_i} \right) + \dots - 1 \right] , \quad (2.53)$$

από την οποία:

$$J \approx \pi r^3 h . \quad (2.54)$$

Η παραμόρφωση  $w_o$  δίνεται από την σχέση :

$$\varepsilon_{long} = \frac{M_{\max}(h/2)}{EJ} . \quad (2.55)$$

Η μέγιστη τιμή του  $M_{\max}$  προκύπτει όταν  $(\cos \pi x/\ell = 1)$ , οπότε:

$$\varepsilon_{long} = \frac{\pi^4 J w_o}{\ell^2} \frac{r}{J} , \quad (2.56)$$

από όπου:

$$w_o = \frac{\varepsilon_{long} \ell^2}{\pi^2 r} . \quad (2.57)$$

Θέτοντας στην εξίσωση (2.50) τις τιμές των εξισώσεων (2.54) και (2.57) προκύπτει η ενέργεια παραμόρφωσης:

$$SE_{long} = \frac{\pi}{4} \varepsilon_{long}^2 E r h \ell . \quad (2.58)$$

Εξισώνοντας την  $SE_{long}$  στην  $KE$  που δίνεται από την εξίσωση (2.23) προκύπτει :

$$\frac{\pi}{4} \varepsilon_{long}^2 Erh\ell = \frac{C^2 \rho_s c^2 r \ell X^2}{R} , \quad (2.59)$$

η οποία μετά από την αντικατάσταση του  $C$  , και μετά από απλοποίηση γίνεται:

$$\varepsilon_{long} = \left[ \frac{4(1-m)}{\pi^{3/2}} \right] \frac{\rho_s^{1/2} c X}{E^{1/2} h^{1/2} R^{1/2}} . \quad (2.60)$$

Η ποσότητα  $[4(1-m)\pi^{3/2}]$  είναι ο συντελεστής  $C_L$  παρόμοιος με τον  $C_c$  της εξίσωσης (2.37) για την εφαπτομενική παραμόρφωση. Αυτή η τελευταία αντικατάσταση δίνει:

$$\varepsilon_{long} = C_L \frac{\rho_s^{1/2} c X}{E^{1/2} h^{1/2} R^{1/2}} . \quad (2.61)$$

## 2.2.5 Προσδιορισμός των τελικών λύσεων με την χρήση δεδομένων από πειράματα

Οι σχέσεις που προσδιορίστηκαν στα προηγούμενα για τον υπολογισμό των εφαπτομενικών και διάμικων παραμορφώσεων, που προκαλούνται από σημειακή πηγή έκρηξης, είναι αντίστοιχα:

$$\varepsilon_{cir} = C_c \left( \frac{\rho_s^{1/2} c X}{E^{1/2} h^{1/2} R^{1/2}} \right) , \quad (2.37)$$

$$\varepsilon_{cir} = C_1 \left( \frac{W_e}{\sqrt{p_o} E h} R^{2.5} \right) . \quad (2.62)$$

Οι παράμετροι στην εξίσωση (2.62), μετατράπηκαν στις μονάδες που χρησιμοποιούνται στα πειράματα υπαίθρου. Οι αντικαταστάσεις που έγιναν ήταν:

ποσότητα ( $nW$ ) ως ισοδύναμες λίβρες ANFO αντί για  $We$ , η ποσότητα 14.7 psi αντί για  $\rho_0$ . Επίσης, έγιναν οι κατάλληλες μετατροπές μονάδων, έτσι ώστε το  $R$  να

είναι σε πόδια ( $ft$ ), το  $E$  σε psi, και το  $h$  σε ίντσες ( $in$ ). Έτσι προκύπτει η εξίσωση (2.63):

$$\varepsilon_{cir} = C_2 \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh}R^{2.5}} \right). \quad (2.63)$$

Η παράμετρος  $C_2$  περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες μονάδες μετατροπής, ώστε το δεξί μέλος της εξίσωσης να είναι αδιάστατο.

Όλα τα στοιχεία για τις εφαπτομενικές παραμορφώσεις θα μπορούσαν να εγκατασταθούν μαζί για να παραγάγουν μια εξίσωση που να ισχύει και για την σημειακή πηγή έκρηξης, αλλά και για την πηγή με μορφή γραμμής. Το ίδιο ισχύει και για τις διαμήκεις παραμορφώσεις. Από πειράματα που ακολούθησαν προέκυψε:

$$\varepsilon_{cir} = 4.78x^{0.805}, \quad (2.64)$$

και

$$\varepsilon_{long} = 1.98x^{0.735}. \quad (2.65)$$

όπου ο όρος  $x$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$x = \frac{nW}{\sqrt{Eh}R^{2.5}} \text{ (σημειακή πηγή)}. \quad (2.66)$$

### 2.2.6 Οι τελικές εξισώσεις για τις παραμορφώσεις στον αγωγό

Παραπάνω, για τις μέγιστες παραμορφώσεις και τάσεις που αναπτύσσονται σε υπόγειο αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου λόγω μιας έκρηξης, αναπτύχθηκαν συναρτησιακές σχέσεις, που στηρίζονται στη θεωρία ομοιότητας. Οι προκύπτουσες εξισώσεις για την πρόβλεψη των μέγιστων ελαστικών παραμορφώσεων στον αγωγό από πυροδότηση σημειακής πηγής που είναι τοποθετημένη στο έδαφος, σε ίδιο περίπου βάθος με τον αγωγό είναι:

$$\varepsilon_{cir} = 4.78 \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh} R^{2.5}} \right)^{0.805}, \quad (2.67)$$

και

$$\varepsilon_{long} = 1.98 \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh} R^{2.5}} \right)^{0.735}. \quad (2.68)$$

Για αυτές τις εξισώσεις πρόβλεψης των παραμορφώσεων έχουμε :

$\varepsilon_{cir}$  = είναι η μέγιστη εφαπτομενική παραμόρφωση σε *psi*,

$\varepsilon_{long}$  = είναι η μέγιστη διαμήκης παραμόρφωση σε *psi*,

$n$  = είναι η ισοδύναμη ενεργειακή απελευθέρωση (αδιάστατο μέγεθος),

$W$  = είναι το συνολικό βάρος της σημειακής γόμωσης σε *lb*,

$E$  = είναι το μέτρο ελαστικότητας σε *psi*,

$h$  = είναι το πάχος τοιχώματος του αγωγού σε *in*, και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών (*ft*).

Σε αυτές τις εξισώσεις, οι παράμετροι πρέπει να εισαχθούν με τις μονάδες που παρουσιάζονται.

Οι τάσεις που ασκήθηκαν για να αναπτυχθούν, αυτές οι λύσεις κυμάνθηκαν από 10 έως 1500 *min /in*. Αυτή η σειρά πρέπει να καλύπτει τις περισσότερες καταστάσεις ανατίναξης χρησιμοποιώντας τις σημειακές πηγές που θάβονται στο έδαφος κοντά

στους αγωγούς αερίου. Η εκτίμηση του τυποποιημένου λάθους των στοιχείων παραμόρφωσης για τις δύο καμπύλες των λύσεων ήταν αντίστοιχα 44 % και 36% για τις εφαπτομενικές και διαμήκεις παραμορφώσεις.

Στο Σχήμα 3-2, στο Κεφάλαιο 3, φαίνεται το διάγραμμα της παραμόρφωσης και όλα τα αντίστοιχα στοιχεία που προκύπτουν από τα πειράματα της SwRI για σημειακή και γραμμικά πηγή. Στο Σχήμα 3-3 , φαίνεται ένα αντίστοιχο διάγραμμα για τις διαμήκεις παραμορφώσεις. Η διασπορά των στοιχείων για τα δύο διαγράμματα, όπως υποδεικνύεται από την εκτίμηση του τυποποιημένου λάθους S, είναι ικανοποιητική. Επίσης, το μεγάλο εύρος των τιμών των στοιχείων, δείχνει ότι οι παραπάνω εξισώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραμορφώσεις του αγωγού που κυμαίνονται από 10 έως 1.500  $\mu\text{in/in}$ .

## 2.2.7 Εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό

Έχοντας προσδιορίσει τις κύριες παραμορφώσεις στον αγωγό, οι τάσεις μπορούν να υπολογιστούν με βάση τις παρακάτω γνωστές σχέσεις της διδιάστατης ελαστικότητας:

$$\sigma_{cir} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{cir} + \nu \epsilon_{long}) , \quad (2.69)$$

$$\sigma_{long} = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{long} + \nu \epsilon_{cir}) . \quad (2.70)$$

Για να προκύψουν απλούστερες εξισώσεις, γίνεται η παρακάτω προσέγγιση:

Για μια σημειακή πηγή έκρηξης, γράφτηκε:

$$\epsilon_{long} = f_{\sigma} \left( \frac{nW}{\sqrt{EhR^{2.5}}} \right) , \quad (2.71)$$

από όπου

$$\frac{\sigma_{long}}{E}, \frac{\sigma_{long}}{E} = f_{\sigma} \left( \frac{nW}{\sqrt{EhR^{2.5}}} \right). \quad (2.72)$$

Στην πράξη οι παραμορφώσεις από τις εκρήξεις που εκτιμήθηκαν θα μετατραπούν σε τάσεις, ώστε να μπορούν να συνδυαστούν με άλλες τάσεις στον αγωγό, ώστε να προσδιοριστούν οι συνολικές τάσεις. Αυτή η διαδικασία μετασχηματισμού μπορεί να υπαγορευθεί από την πολιτική της επιχείρησης, ή να αποφασιστεί από τον μηχανικό που είναι υπεύθυνος για τις εκρήξεις. Με σκοπό να εξαλειφθεί το βήμα του μετασχηματισμού των παραμορφώσεων σε τάσεις από το χρήστη, για κάθε δοκιμή υπολογίστηκαν οι μέγιστες διαξονικές τάσεις, χρησιμοποιώντας τις μέγιστες παραμορφώσεις, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.69) και (2.70). Αυτός ο μετασχηματισμός υποθέτει ότι, οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στον αγωγό ταυτόχρονα στο ίδιο σημείο, τόξο, με το ίδιο πρόσημο, και στην ίδια αιχμή. Χρησιμοποιώντας τις διαξονικές παραμορφώσεις, παρήχθησαν οι εξισώσεις για τις εφαπτομενικές και διαμήκεις τάσεις, που σχεδόν συνέπεσαν η μια με την άλλη. Επομένως, όλες οι συνιστώσες των τάσεων, χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν μια ενιαία συνάρτηση. Η προκύπτουσα εξίσωση για την πρόβλεψη των μέγιστων τάσεων που ασκούνται στον αγωγό από σημειακή γόμωση είναι :

$$\frac{\sigma}{E} = 4.44 \chi^{0.77}, \quad (2.73)$$

όπου ο όρος  $\chi$  ορίζεται ως ακολούθως:

$$\chi = \frac{nW}{\sqrt{EhR^{2.5}}}, \text{ για σημειακή πηγή.} \quad (2.74)$$

Έτσι, η εξίσωση που προκύπτει για την πρόβλεψη της μέγιστης τάσης στον αγωγό για σημειακή πηγή έκρηξης στο έδαφος είναι:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 4.44 \times E \times \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh}R^{2.5}} \right)^{0.77}, \quad (2.75)$$

όπου

$\sigma_{cir}$  = είναι η μέγιστη εφαπτομενική τάση σε *psi*,

$\sigma_{long}$  = είναι η μέγιστη διαμήκης τάση σε *psi*,

$n$  = είναι η ισοδύναμη απελευθέρωση ενέργειας, αδιάστατο μέγεθος,

$W$  = είναι το συνολικό βάρος των γομώσεων στη πηγή έκρηξης σε *lb*,

$E$  = είναι το μέτρο ελαστικότητας σε *psi*,

$h$  = είναι το πάχος τοιχώματος του αγωγού σε *in*, και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών σε *ft*, ( $R > 2$  διαμέτρων).

Στο Σχήμα 3-5, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της καμπύλης που προσδιορίστηκε από την εξίσωση (2.73) και των στοιχείων από τα πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της τελικής σχέσης. Η εξίσωση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περίπτωση πυροδότησης σημειακής γόμωσης και παράλληλης γραμμής κοντά στον αγωγό. Οι μέγιστες τάσεις κυμάνθηκαν σε τιμές κάτω από την τάση διαρροής των περισσότερων χαλύβδινων αγωγών ως και *4Mpa*. Αυτό το εύρος είναι αρκετά μεγάλο και καθιστά την εξίσωση εφαρμόσιμη στις περισσότερες καταστάσεις ανατίναξης κοντά σε χαλύβδινους αγωγούς, σε απόσταση από την πηγή μεγαλύτερη των δυο διαμέτρων.

Η παραπάνω εξίσωση στο διεθνές σύστημα μονάδων, παίρνει την μορφή:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 0.0051135 \times E \times \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh}(R)^{2.5}} \right)^{0.77}, \quad (2.76)$$

όπου

$\sigma_{cir}$  = είναι η μέγιστη εφαπτομενική τάση σε *Mpa*,

$\sigma_{long}$  = είναι η μέγιστη διαμήκης τάση σε *Mpa*,

$n$  = είναι η ισοδύναμη απελευθέρωση ενέργειας, αδιάστατο μέγεθος,

$W$  = είναι το συνολικό βάρος των γομώσεων στη πηγή έκρηξης σε *N*,



$E$  = είναι το μέτρο ελαστικότητας σε  $Mpa$ ,

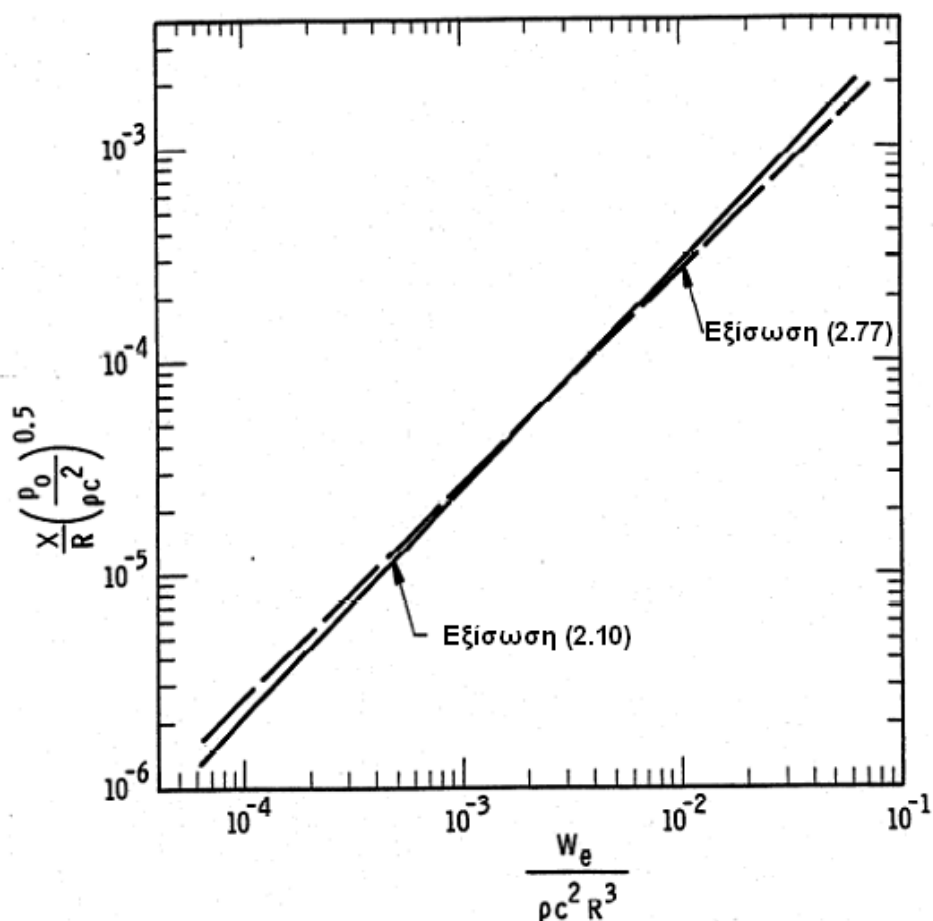
$h$  = είναι το πάχος τοιχώματος του αγωγού σε  $mm$ , και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών σε  $m$ , ( $R > 2$  διαμέτρων).

Για μια σημειακή πηγή, η εξίσωση (2.12), μπορεί να απλοποιηθεί περισσότερο στην μορφή :

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.0262 \left( \frac{W_e}{\rho c^2 R^3} \right). \quad (2.77)$$

Στο Σχήμα 2-6, η καμπύλη που προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση, συγκρίνεται με αυτήν της εξίσωσης (2.10). Παρατηρείται ότι η προσέγγιση είναι αρκετά καλή.



**Σχήμα 2-6: Συγκριση μεταξύ της καμπύλης από την προσεγγιστική λύση για την μετατόπιση, με την καμπύλη των γραμμικών λογαριθμικών δεδομένων για σημειακή πηγή έκρηξης**



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΗΓΗ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΔΑΦΟΣ

#### 3.1 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία του Esparza για τον προσδιορισμό της μέγιστης ταχύτητας  $U$  ενός υλικού σωματιδίου του εδάφους και της μέγιστης ακτινικής μετατόπισης  $X$ , που προκαλούνται από πυροδοτήσεις εκρηκτικών γραμμικής πηγής μέσα σε ένα ομοιογενές έδαφος. Οι ποσότητες αυτές είναι αναγκαίες επειδή οι δονήσεις του εδάφους εισάγουν τις δυνάμεις που ασκούνται από εκρήξεις πάνω σε έναν αγωγό μεταφοράς που βρίσκεται τοποθετημένος στο έδαφος. Επιπρόσθετα, πολλοί κανονισμοί που έχουν θεσπιστεί σε διάφορες χώρες για να ελέγχουν τις εκρήξεις κοντά σε αγωγούς μεταφοράς φυσικού αερίου, στηρίζονται στο κριτήριο της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, κοντά σε αγωγούς.

##### 3.1.1 Η προσέγγιση του Esparza για γραμμική πηγή έκρηξης

Όταν ένας αριθμός από γομώσεις ίσων διαστάσεων και ίδιου βάρους είναι τοποθετημένες σε γραμμή και πυροδοτούνται ταυτόχρονα, οι ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις των σωματιδίων του εδάφους, διαφέρουν από εκείνες της σημειακής πηγής. Μια σειρά από εκρηκτικά τύπου σημείου μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πηγή παράλληλης γραμμής, όταν η απόσταση μεταξύ του αγωγού και των εκρηκτικών  $R$  είναι μικρότερη από το μήκος της εκρηκτικής γραμμής  $L$ , το διάστημα μεταξύ των γομώσεων  $y$  είναι μικρότερο από την απόσταση  $R$ , και ο άξονας μεταφοράς της

ενέργειας από τις εκρήξεις είναι κάθετος στην γραμμή έκρηξης. Όλα τα στοιχεία δοκιμής, που καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις, χρησιμοποιήθηκαν στις κατάλληλες λογάριθμο-γραμμικές εξισώσεις καμπύλων, για τον υπολογισμό της εδαφικής μετατόπισης και των ταχυτήτων των υλικών σωματιδίων για τις εκρηκτικές πηγές με μορφή παράλληλης γραμμής. Για αυτό στις εξισώσεις (2.6) και (2.7) που

αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2, ο λόγος  $\left(\frac{W_e}{\rho c^2 R^3}\right)$  πρέπει να αντικατασταθεί από τον

λόγο  $\left(\frac{W_e/L}{\rho c^2 R^2}\right)$ . Οπότε η μορφή των εξισώσεων γίνεται:

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = f_x \left( \frac{W_e/L}{\rho c^2 R^2} \right), \quad (3.1)$$

$$\frac{U}{c} \left( \frac{p_o}{\rho c^2 R^2} \right)^{0.5} = f_u \left( \frac{W_e/L}{\rho c^2 R^2} \right). \quad (3.2)$$

Για τον προσδιορισμό των παραπάνω εξισώσεων, επιλέχθηκαν μόνο τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τους αισθητήρες που απείχαν από τις γομώσεις λιγότερο από το μήκος της εκρηκτικής γραμμής. Έτσι, ο λόγος της  $R$  ως προς το  $L$  ήταν μικρότερος από 0.7 και η αναλογία της  $R$  ως προς την απόσταση των γομώσεων δεν ήταν μικρότερη από 1.33.

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία των επίγειων κινήσεων της SwRI και μερικών στοιχείων από το ορυχείο του H. Nicholls (BOM), όσον αφορά την ταχύτητα ταλάντωσης των υλικών σωματιδίων, οι απλοποιημένες εξισώσεις για τον προσδιορισμό των ακτινικών εδαφικών μετατοπίσεων για πηγές έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής είναι:

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.0746 \left( \frac{\frac{w_e}{L}}{\rho c^2 R^2} \right)^{1.073}, \quad (3.3)$$

και

$$\frac{U}{C} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.00465 \left( \frac{\frac{w_e}{L}}{\rho c^2 R^2} \right)^{0.734}, \quad (3.4)$$

όπου

$X$  = είναι η μέγιστη ακτινική εδαφική μετατόπιση σε  $ft$ ,

$U$  = είναι η μέγιστη ταχύτητα υλικού σωματιδίου του εδάφους σε  $ft/sec^2$ ,

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ αγωγού και σημειακής πηγής σε  $ft$ ,

$w_e$  = είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την έκρηξη σε  $lb-ft$ ,

$\rho$  = είναι η πυκνότητα του εδαφικού υλικού σε  $lb-sec^2/ft^4$ ,

$c$  = είναι η ταχύτητα των σεισμικών P -κυμάτων στο έδαφος,

$p_o$  = είναι η ατμοσφαιρική πίεση σε  $lb/ft^2$ , και

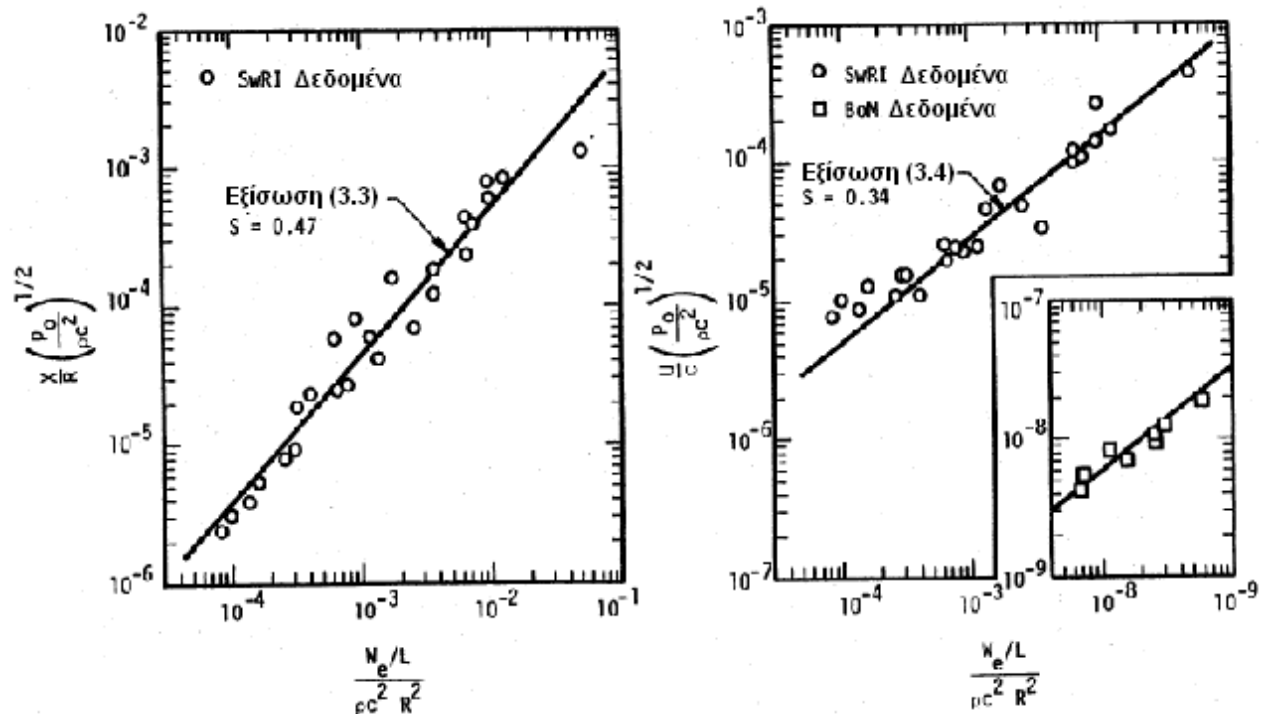
και  $R \leq L$ , όπου  $R/L \leq 1.0$ .

Στις παραπάνω εξισώσεις, κάθε ομάδα παραμέτρων είναι αδιάστατη και επομένως, οι εξισώσεις αυτές, μπορούν να προσαρμοσθούν κατάλληλα σε οποιοδήποτε σύστημα μονάδων. Οι απλοποιημένες αυτές εξισώσεις παρέχουν τις ακτινικές εδαφικές μετατοπίσεις σε ένα σημείο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε βάθος όσο είναι το βάθος που βρίσκεται το κέντρο του αγωγού. Στις δοκιμές, το βάθος αυτό αντιστοιχούσε συνήθως σε δύο διαμέτρους αγωγών. Οι εξισώσεις αυτές πρέπει να ισχύσουν για ένα λογικό εύρος βαθών μέχρι σχεδόν την επιφάνεια του εδάφους. Επομένως, οι απλούστερες εξισώσεις (3.3) και (3.4) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των εδαφικών μετατοπίσεων από γραμμικές πηγές στο έδαφος μέσα στο εφαρμόσιμο εύρος.

Οι συνεχείς καμπύλες για γραμμική πηγή έκρηξης που ορίζονται από τις παραπάνω εξισώσεις φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 3-1. Παρατηρούμε, ότι οι εξισώσεις αυτές ταιριάζουν καλά με τα πειραματικά δεδομένα.

Οι εκτιμήσεις του σύνηθες σφάλματος είναι για την μετατόπιση και την ταχύτητα αντίστοιχα 0.47 και 0.35. Στις περιπτώσεις πεδίου με αντίστοιχο περιβάλλον με αυτό των πειραμάτων της SwRI οι εξισώσεις (3.3) και (3.4) οφείλουν να παρέχουν ικανοποιητικές τιμές για τις κινήσεις του εδάφους, μέσα σε ένα εύρος ανηγμένων βαρών,

$$10^{-4} < \frac{w_e/L}{\rho c^2 R^2} < 10^{-1}$$



Σχήμα 3-1: Σχέσεις προσδιορισμού της ακτινικής εδαφικής μετατόπισης για πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό

## 3.2 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΗΓΗ

### 3.2.1 Προσδιορισμός της εφαπτομενικής και διαμήκους παραμόρφωσης από γραμμική πηγή έκρηξης

Όπως και στην περίπτωση της σημειακής γόμωσης που μελετήθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρόμοια προκύπτει και η εξίσωση των εφαπτομενικών και διαμήκων παραμορφώσεων που προκαλούνται στον αγωγό από πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό. Έτσι, προκύπτει η εξίσωση:

$$\varepsilon = C_3 \frac{(nW/L)}{\sqrt{EhR^{1.5}}} \quad , \quad (3.5)$$

όπου η ποσότητα  $(nW)$  είναι σε ισοδύναμες λίβρες ANFO, το  $R$  είναι σε πόδια  $ft$ , το  $E$  σε psi, και το  $h$  σε ίντσες ( $in$ ). Η παράμετρος  $C_3$  περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες μονάδες μετατροπής, ώστε το δεξί μέλος της εξίσωσης να είναι αδιάστατο.

Για να προσδιοριστούν οι εξισώσεις πρόβλεψης, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τις δοκιμές πεδίου. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα στοιχεία για τα οποία ίσχυαν  $(R/L < 0.5)$  και  $(y/R < 0)$ .

Όλα τα στοιχεία για τις εφαπτομενικές παραμορφώσεις θα μπορούσαν να εγκατασταθούν μαζί για να παραγάγουν μια εξίσωση που να ισχύει και για την σημειακή πηγή έκρηξης, αλλά και για την πηγή με μορφή γραμμής. Το ίδιο ισχύει και για τις διαμήκεις παραμορφώσεις. Η μόνη απαραίτητη ρύθμιση ήταν να εισαχθεί μια διαφορετική αριθμητική σταθερά στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.5) για την πηγή με μορφή γραμμής. Από πειράματα που ακολούθησαν προέκυψε:

$$\varepsilon_{cir} = 4.78 x^{0.805} \quad , \quad \text{και} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{long} = 1.98 x^{0.735} \quad , \quad (3.7)$$

όπου ο όρος  $\chi$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$\chi = \frac{1.3nW/L}{\sqrt{Eh}R^{1.5}} \quad (\text{πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής}). \quad (3.8)$$

### 3.2.2 Οι τελικές εξισώσεις για τις παραμορφώσεις στον αγωγό

Παραπάνω, για τις μέγιστες παραμορφώσεις και τάσεις που αναπτύσσονται σε υπόγειο αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου λόγω μιας έκρηξης, αναπτύχθηκαν συναρτησιακές σχέσεις, που στηρίζονται στη θεωρία ομοιότητας. Οι προκύπτουσες εξισώσεις για την πρόβλεψη των μέγιστων ελαστικών παραμορφώσεων στον αγωγό από πυροδότηση σημειακής πηγής που είναι τοποθετημένη στο έδαφος, σε ίδιο περίπου βάθος με τον αγωγό, είναι:

$$\varepsilon_{cir} = 4.78 \left( \frac{1.3 n (W / L)}{\sqrt{Eh} R^{2.5}} \right)^{0.805}, \quad (3.9)$$

και

$$\varepsilon_{long} = 1.98 \left( \frac{1.3 n (W / L)}{\sqrt{E h} R^{1.5}} \right)^{0.735}, \quad (3.10)$$

όπου για αυτές τις εξισώσεις πρόβλεψης των παραμορφώσεων:

$\varepsilon_{cir}$  = είναι η μέγιστη εφαπτομενική παραμόρφωση σε *psi*,

$\varepsilon_{long}$  = είναι η μέγιστη διαμήκης παραμόρφωση σε *psi*,

$n$  = είναι η ισοδύναμη ενεργειακή απελευθέρωση (αδιάστατο μέγεθος),

$W$  = είναι το συνολικό βάρος της σημειακής γόμωσης σε *lb*,

$E$  = είναι το μέτρο ελαστικότητας σε *psi*,

$h$  = είναι το πάχος τοιχώματος του αγωγού σε *in*, και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών (*ft*).

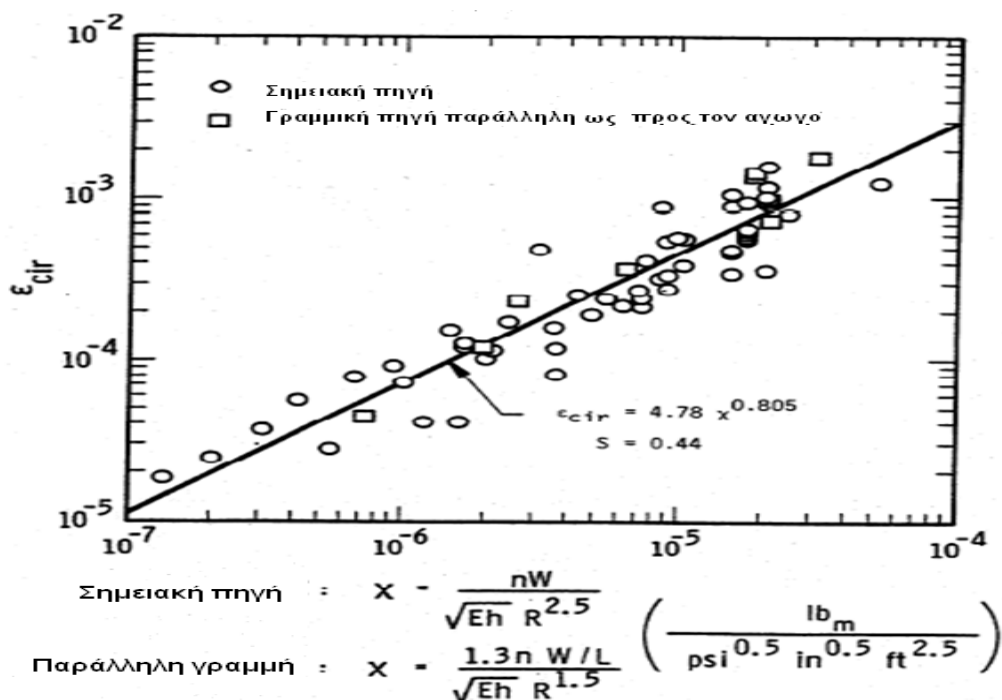
Σε αυτές τις εξισώσεις, οι παράμετροι πρέπει να εισαχθούν με τις μονάδες που



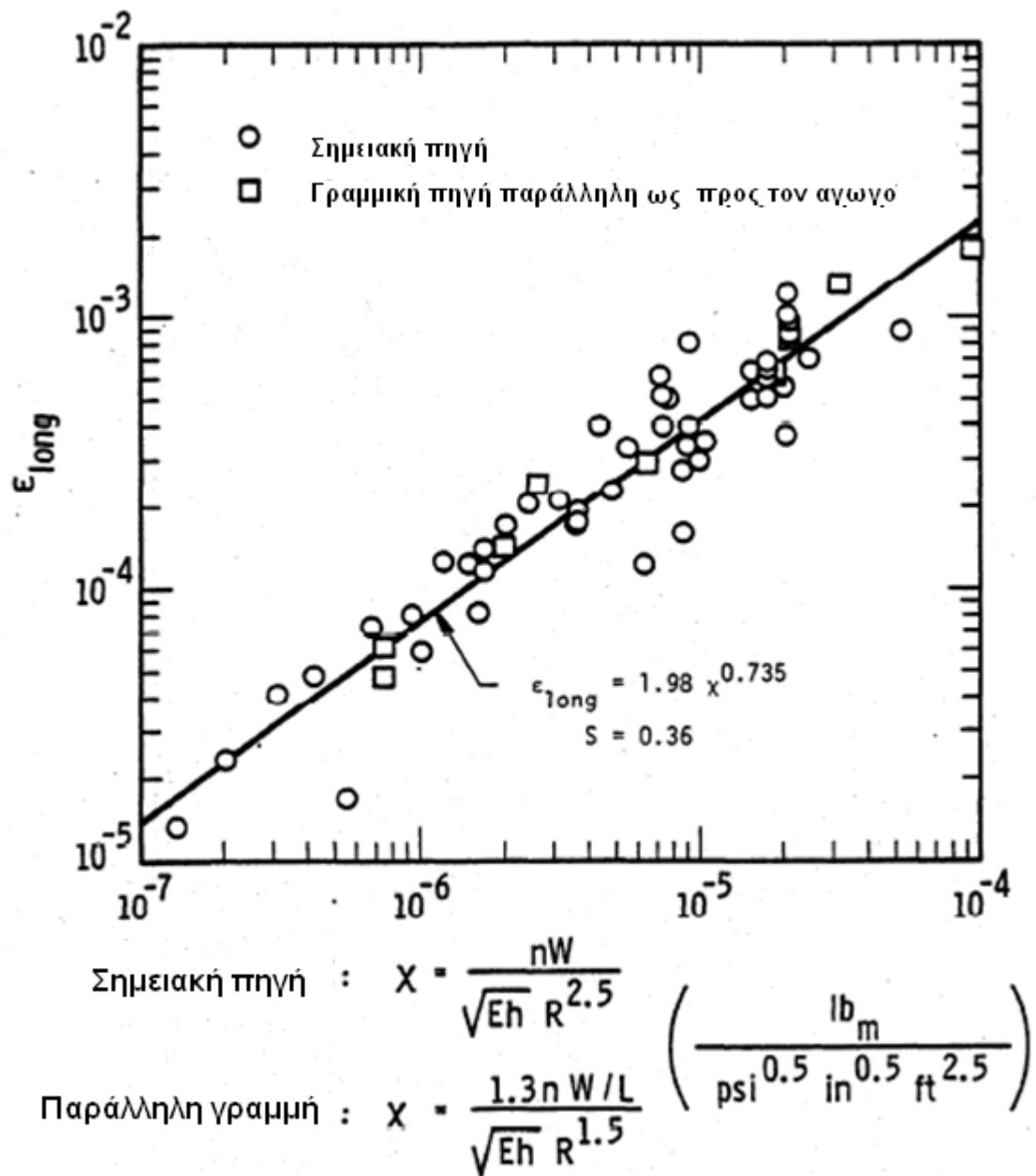
παρουσιάζονται.

Οι μέγιστες παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στον αγωγό, από παράλληλες γραμμικές πηγές ήταν από 43 έως 1.780  $\mu\text{in}/\text{in}$ , αυτό καθιστά αυτές τις λύσεις έγκυρες για τις περισσότερες περιπτώσεις ανατίναξης όπου η πηγή έχει μορφή παράλληλης γραμμής που είναι θαμμένη στο έδαφος κοντά στους αγωγούς φυσικού αερίου. Η εκτίμηση του τυποποιημένου λάθους που παρατηρείται στις εξισώσεις (3.9) και (3.10) είναι 44 και 36% αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 3-2, φαίνεται το διάγραμμα της παραμόρφωσης και όλα τα αντίστοιχα στοιχεία που προκύπτουν από τα πειράματα της SwRI για σημειακή και γραμμικά πηγή. Στο σχήμα 3-3, είναι ένα αντίστοιχο διάγραμμα για τις διαμήκεις παραμορφώσεις. Η διασπορά των στοιχείων για τα δύο διαγράμματα, όπως υποδεικνύεται από την εκτίμηση του τυποποιημένου λάθους  $S$ , είναι ικανοποιητική. Επίσης, το μεγάλο εύρος των τιμών των στοιχείων, δείχνει ότι οι παραπάνω εξισώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραμορφώσεις του αγωγού που κυμαίνονται από 10 έως 1.500  $\mu\text{in}/\text{in}$ .



**Σχήμα 3-2: Διάγραμμα της εφαπτομενικής παραμόρφωσης συναρτήση του  $x$ , που προκαλείται από πηγή σημείου και από γραμμική πηγή έκρηξης**



Σχήμα 3-3: Διάγραμμα της διαμήκουσ παραμόρφωσης συναρτήση του  $\chi$ , που προκαλείται από πηγή σημείου και από γραμμική πηγή έκρηξης

### 3.2.3 Εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό

Έχοντας προσδιορίσει τις κύριες παραμορφώσεις στον αγωγό, οι τάσεις μπορούν να υπολογιστούν με βάση τις παρακάτω γνωστές σχέσεις της διδιάστατης ελαστικότητας:

$$\sigma_{cir} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{cir} + \nu \varepsilon_{long}) , \quad (2.69)$$

$$\sigma_{long} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{long} + \nu \varepsilon_{cir}) . \quad (2.70)$$

Για να προκύψουν απλούστερες εξισώσεις, γίνεται η παρακάτω προσέγγιση:

Για μια σημειακή πηγή έκρηξης, γράφτηκε:

$$\varepsilon_{long} = f_{\sigma} \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh}R^{2.5}} \right) , \quad (2.71)$$

από όπου για γραμμική πηγή έκρηξης, προκύπτει:

$$\frac{\sigma_{long}}{E} , \frac{\sigma_{long}}{E} = f_{\sigma} \left( \frac{n W/L}{\sqrt{E h} R^{1.5}} \right) . \quad (3.11)$$

Από την εξίσωση για την σημειακή γόμωση, προέκυψε η εξίσωση για την πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό. Αυτό έγινε εισάγοντας μια αριθμητική σταθερά στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.11). Χρησιμοποιώντας τις διαξονικές παραμορφώσεις, παρήχθησαν οι εξισώσεις για τις εφαπτομενικές και διαμήκειες τάσεις, που σχεδόν συνέπεσαν η μία με την άλλη. Επομένως, όλες οι συνιστώσες των τάσεων, χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν μια ενιαία συνάρτηση. Η προκύπτουσα εξίσωση για την πρόβλεψη των μέγιστων τάσεων που ασκούνται στον αγωγό από γραμμική έκρηξη που είναι παράλληλη ως προς τον αγωγό μεταφοράς, είναι:

$$\frac{\sigma}{E} = 4.44 \chi^{0.77}, \quad (3.12)$$

όπου ο όρος  $\chi$  ορίζεται ως ακολούθως:

$$\chi = \frac{1.4nW/L}{\sqrt{Eh}R^{1.5}}, \text{ για πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής.} \quad (3.13)$$

Έτσι, η εξίσωση που προκύπτει για την εφαπτομενική και της διαμήκη τάση είναι:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 4.44 \times E \times \left( \frac{1.4n(W/L)}{\sqrt{Eh}R^{1.5}} \right)^{0.77}, \quad (3.14)$$

όπου

$\sigma_{cir}$  = είναι η μέγιστη εφαπτομενική τάση σε *psi*,

$\sigma_{long}$  = είναι η μέγιστη διαμήκης τάση σε *psi*,

$n$  = είναι η ισοδύναμη απελευθέρωση ενέργειας, αδιάστατο μέγεθος,

$W$  = είναι το συνολικό βάρος των γομώσεων στη πηγή έκρηξης σε *lb*,

$E$  = είναι το μέτρο ελαστικότητας σε *psi*,

$h$  = είναι το πάχος τοιχώματος του αγωγού σε *in*, και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών σε *ft*, ( $R > 2$  διαμέτρων).

Οι μέγιστες τάσεις που μετρήθηκαν στα πειράγματα κυμαίνονταν σε τιμές μέχρι  $4Mpa$  κάτω από την καθορισμένη τάση διαρροής των περισσότερων χαλύβδινων αγωγών. Η χρήση της εξίσωσης (3.14) πρέπει να περιοριστεί σε αυτήν την κλίμακα των τιμών τάσης. Αυτή η κλίμακα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες περιπτώσεις πυροδότησης πηγής με μορφή παράλληλης γραμμής, που είναι κοντά σε αγωγούς φυσικού αερίου.

Όλες οι πηγές έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής, από τις οποίες προήλθαν τα στοιχεία για την ανάπτυξη της εξίσωσης (3.14), αντιμετωπίστηκαν ως συνεχείς εκρηκτικές γραμμές. Οι λόγοι για αυτήν την αντιμετώπιση ήταν: η απόσταση μεταξύ

των γομών  $y$  ήταν μικρότερη από την απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών  $R$ , η απόσταση μεταξύ του αγωγού και της πηγής ήταν μικρότερη από το μήκος της εκρηκτικής γραμμής  $L$ , και όλα τα διαστήματα που αποτελούσαν τη γραμμή πυροδοτήθηκαν ταυτόχρονα. Αν το διάστημα μεταξύ των διατρημάτων είναι μεγαλύτερο από την απόσταση  $R$ , τότε κάθε διάτρημα πρέπει να αναλυθεί ως σημειακή πηγή, και αν η απόσταση μεταξύ του αγωγού και της γραμμικής πηγής έκρηξης είναι μεγαλύτερη από το μήκος της εκρηκτικής γραμμής, τότε ολόκληρη η εκρηκτική σειρά μπορεί να αντιμετωπιστεί ως σημειακή πηγή.

Οι εξισώσεις πρόβλεψης για σημειακή πηγή και για μια παράλληλη γραμμή δείχνουν ότι το σημείο για το οποίο έχουμε μετάβαση από την γραμμική πηγή στην σημειακή πηγή, είναι όταν η τιμή της απόστασης μεταξύ του αγωγού και της πηγής έκρηξης  $R$  είναι λίγο μικρότερη από μήκος  $L$  της εκρηκτικής γραμμής. Ωστόσο, για την απλότητα στην εφαρμογή των εξισώσεων που προβλέφθηκαν, συνιστάται μια μετατροπή της τιμής  $R$  σε ισοδύναμη  $L$ . Έτσι, για τις τιμές  $(R / L \leq 1.0)$ , για την εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό, η σειρά από ισοδύναμες γομώσεις πάνω σε ευθεία γραμμή παράλληλη ως προς τον αγωγό, αντιμετωπίζεται ως μια παράλληλη γραμμή με εκρηκτικά. Για τιμές  $(R/L \leq 1.0)$  η εκρηκτική γραμμή αντιμετωπίζεται ως μια ισοδύναμη σημειακή πηγή. Στο Σχήμα 3-4, συνοψίζεται ο τρόπος εκτίμησης των τάσεων στον αγωγό, που προκαλούνται από παράλληλη ως προς αυτόν γραμμή εκρηκτικών πηγών.

Στο Σχήμα 3-5, πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ του διαγράμματος της εξίσωσης (3.14) και των μετρήσεων στα πειράματα. Αυτή η εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περίπτωση πυροδότησης σημειακής γόμωσης και παράλληλης γραμμής κοντά στον αγωγό. Παρατηρείται ότι, ανεξάρτητα από το μέγεθος αγωγών, την περιοχή των πειραμάτων και προσανατολισμό της τάσης, τα στοιχεία από τα πειράματα είναι πάνω και κάτω από το διάγραμμα της εξίσωσης. Αυτό δείχνει ότι η διασπορά των στοιχείων είναι τυχαία.

Η εξίσωση (3.14) στο διεθνές σύστημα μονάδων, παίρνει την μορφή:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 0.0051135 \times E \times \left( \frac{1.4nW/L}{\sqrt{Eh}(R)^{1.5}} \right)^{0.77}, \quad (3.15)$$

όπου

$\sigma_{cir}$  = είναι η μέγιστη εφαπτομενική τάση σε  $Mpa$ ,

$\sigma_{long}$  = είναι η μέγιστη διαμήκης τάση σε  $Mpa$ ,

$n$  = είναι η ισοδύναμη απελευθέρωση ενέργειας, αδιάστατο μέγεθος,

$W$  = είναι το συνολικό βάρος των γομώσεων στη πηγή έκρηξης σε  $N$ ,

$E$  = είναι το μέτρο ελαστικότητας σε  $Mpa$ ,

$h$  = είναι το πάχος τοιχώματος του αγωγού σε  $mm$ , και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και εκρηκτικών σε  $m$ , ( $R > 2$  διαμέτρων).

Για μια πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό μεταφοράς, η εξίσωση (3.3), μπορεί να απλοποιηθεί περισσότερο στην μορφή :

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.0488 \left( \frac{W_e/L}{\rho c^2 R^2} \right). \quad (3.16)$$

Στο Σχήμα 3-6, γίνεται μια σύγκριση των στοιχείων για τις τάσεις που παρατηρήθηκαν το 1980 και των καμπύλων που προσδιορίζονται από τις εξισώσεις πρόβλεψης.

Γενικά για μια πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλη ως προς τον αγωγό είναι:

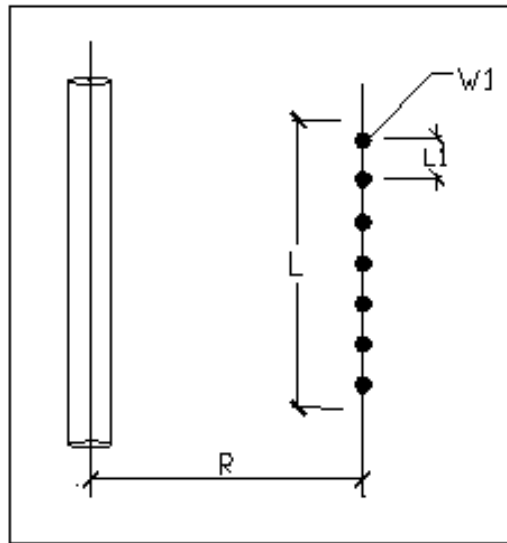
$NI$  = ο αριθμός των γομώσεων πάνω στην γραμμή,

$WI$  = το βάρος έκαστης γόμωσης,

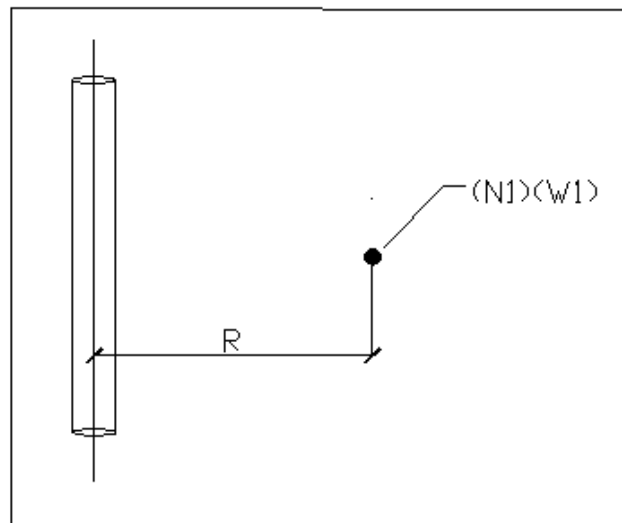
$L = (NI) (LI)$ ,

$W = (NI)(WI)$ , και

$\frac{W}{L} = \frac{W1}{L1}$  = η πυκνότητα της εκρηκτικής ύλης.

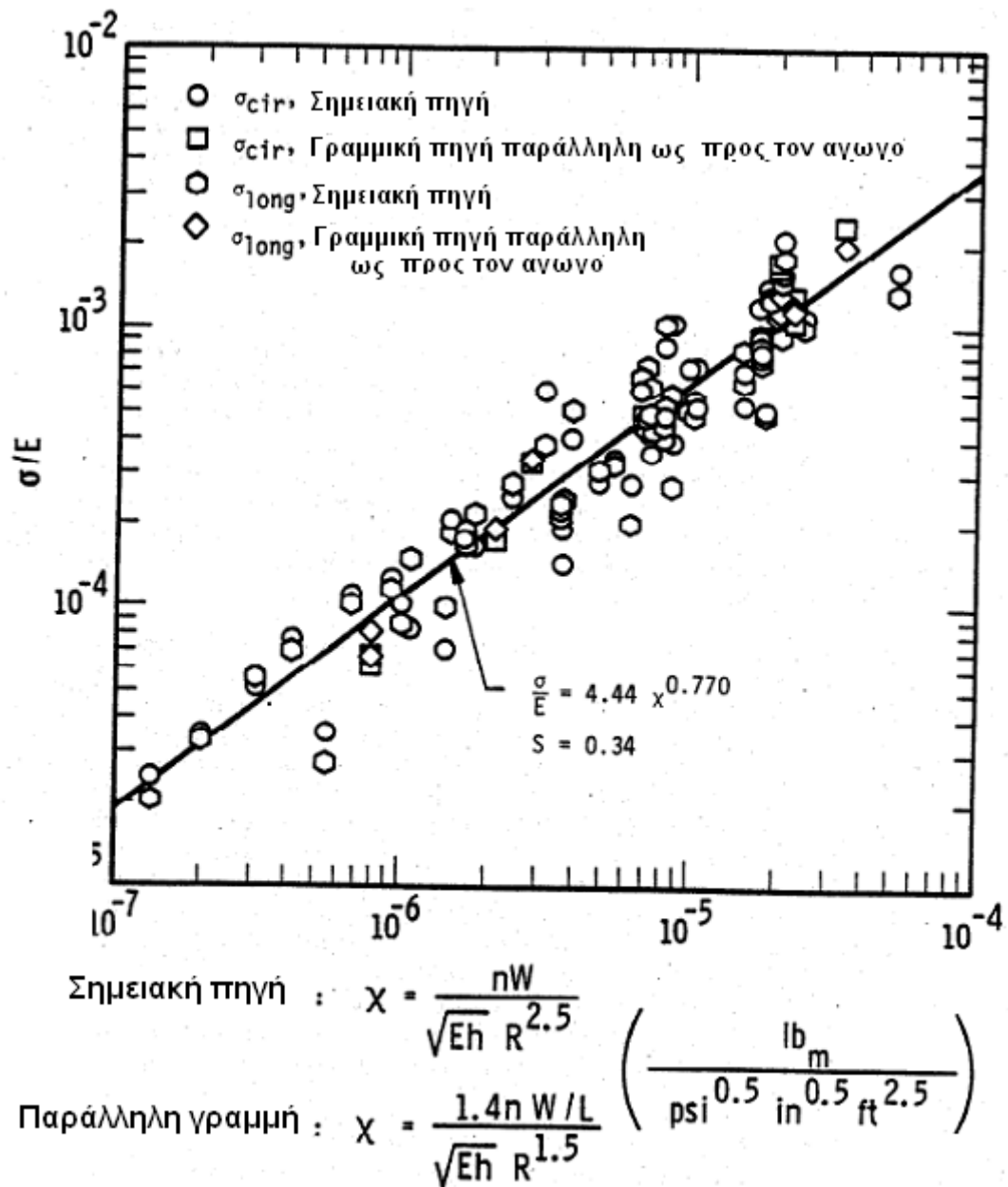


(a) Η παράλληλη γραμμική πηγή και ο αγωγός ( $R \leq L$ )



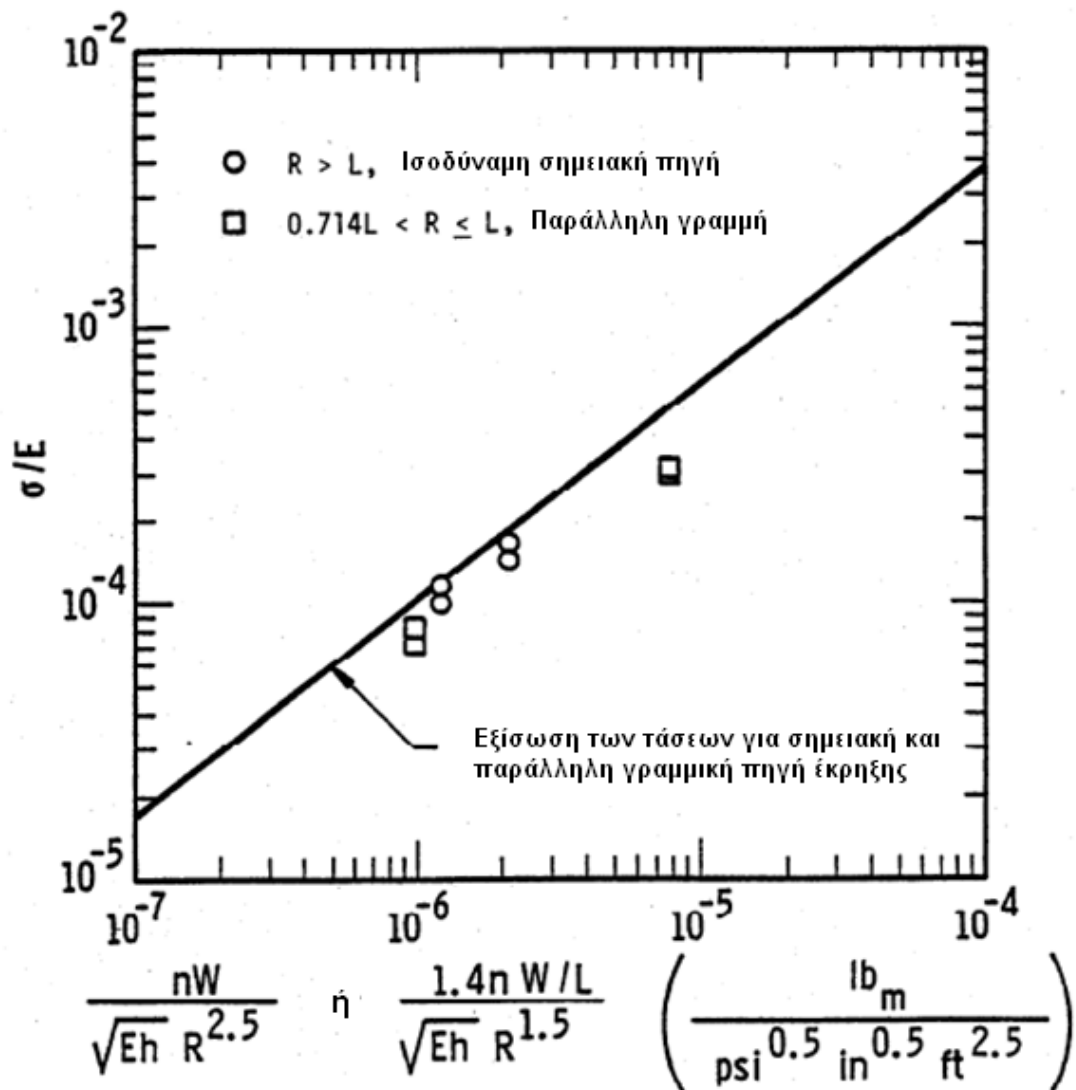
(b) Η ισοδύναμη σημειακή πηγή στην περίπτωση της παράλληλης γραμμικής πηγής ( $R > L$ )

**Σχήμα 3-4: Η πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής**

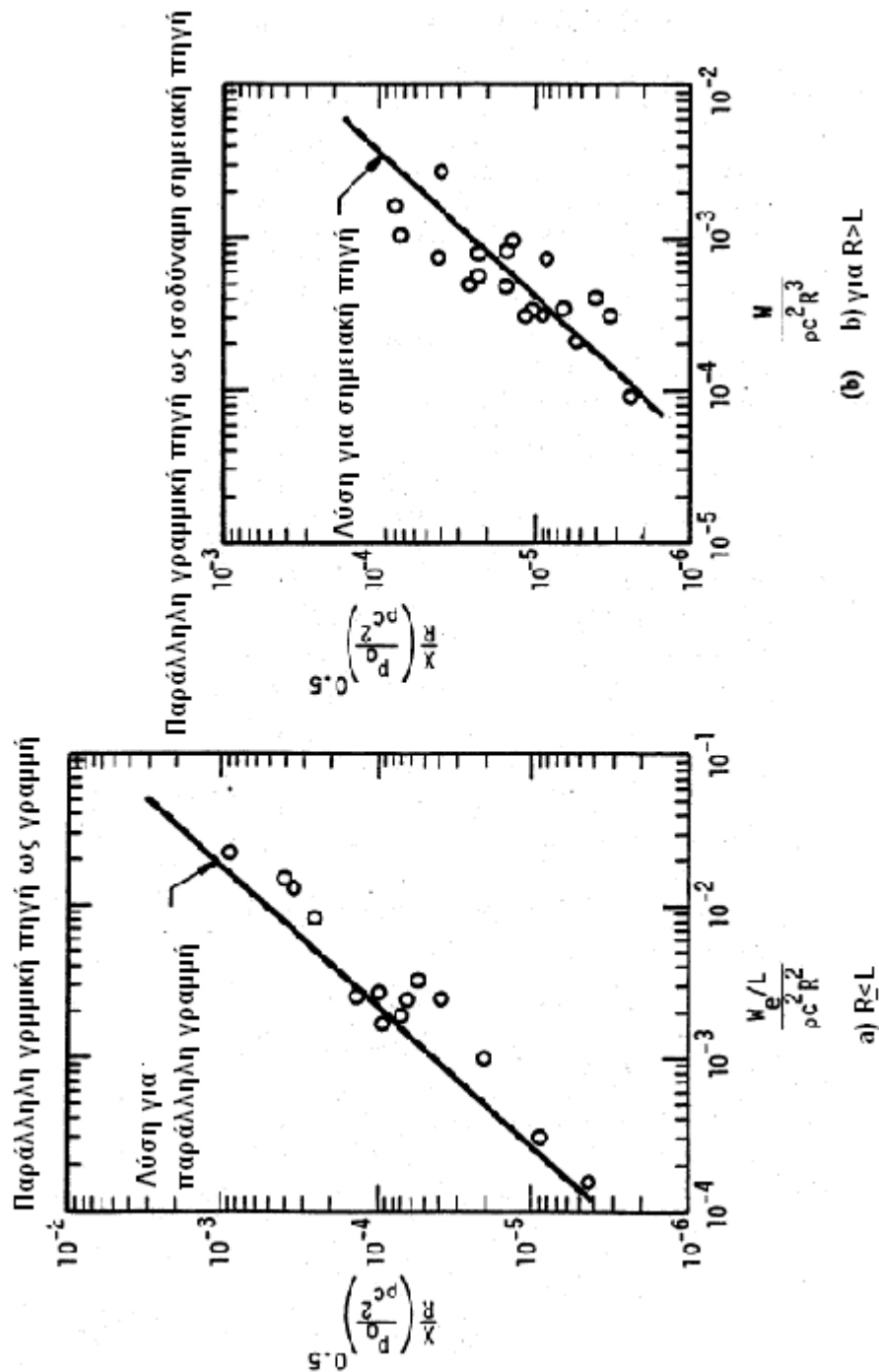


Σχήμα 3-5: Η καμπύλη των εξισώσεων πρόβλεψης για σημειακή γόμωση και για πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό, σε σύγκριση με τα στοιχεία από τα πειράματα

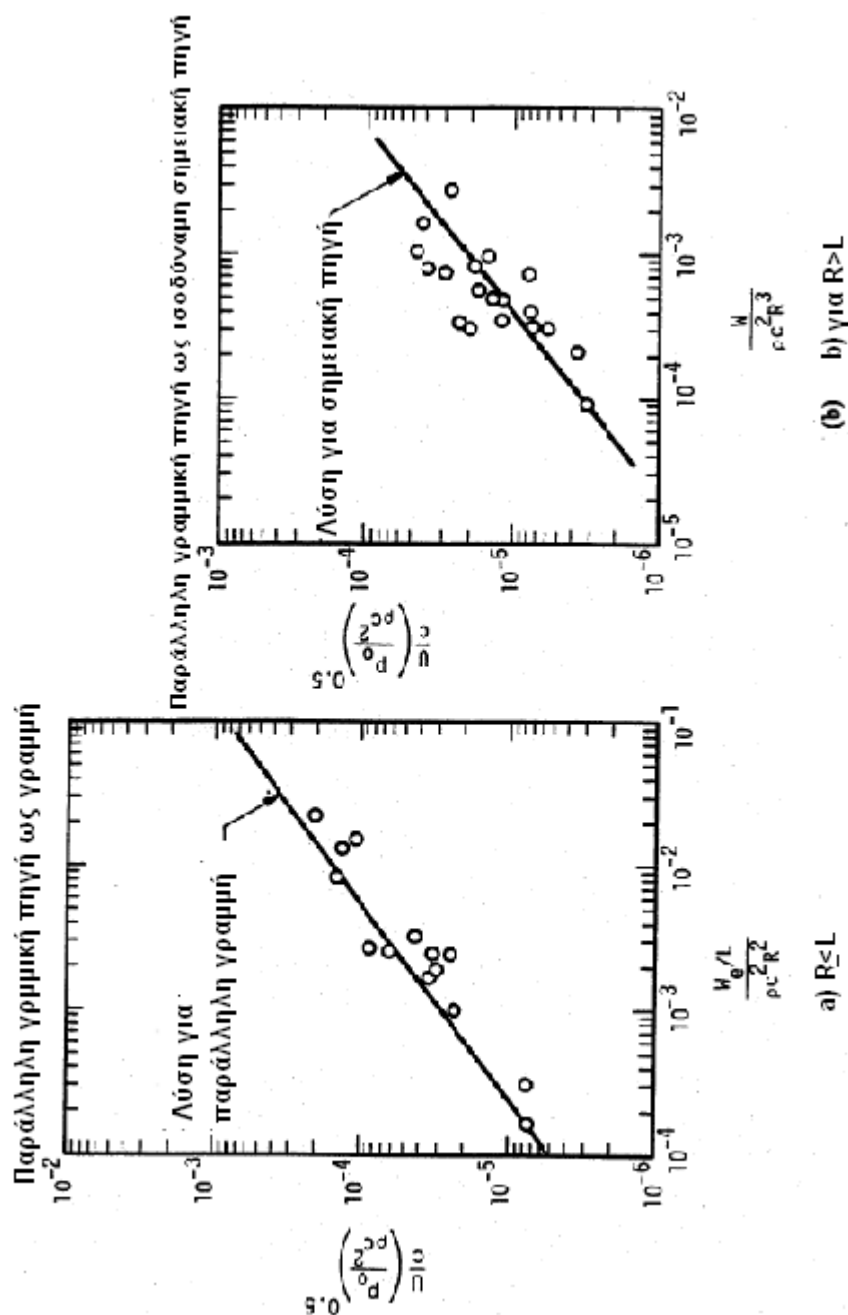




Σχήμα 3-6: Στοιχεία των τάσεων από παράλληλη γραμμή που αντιμετωπίζεται ως ισοδύναμη σημειακή γόμωση ή πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής, σε σύγκριση με την καμπύλη των αντίστοιχων εξισώσεων πρόβλεψης



Σχήμα 3-7: Σύγκριση μεταξύ των ακτινικών εδαφικών μετατοπίσεων που προκαλούνται από πηγές έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής, οι οποίες αντιμετωπίζονται ως παράλληλες γραμμές ή σημειακές γομώσεις



Σχήμα 3-8: Σύγκριση των ακτινικών εδαφικών ταχυτήτων που προκαλούνται από πηγές έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής, οι οποίες αντιμετωπίζονται ως παράλληλες γραμμές ή σημειακές γομώσεις

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΠΗΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΕΛΑΦΟΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, η μέθοδος που παρουσιάστηκε παραπάνω για σημειακή πηγή έκρηξης και για πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό, επεκτείνεται σε σύνθετες γεωμετρίες αναφορικά με την διάταξη των πηγών πυροδότησης. Οι γεωμετρίες αυτές ανάγονται σε ισοδύναμες γομώσεις που βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή παράλληλη στον αγωγό ή σε σημειακή πηγή. Έτσι, τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν για σημειακή πηγή ή για παράλληλη γραμμή μπορούν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση των τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό από πολύπλοκες γεωμετρίες πηγών.

### 4.2 ΠΗΓΗ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΖΕΙ ΓΩΝΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΑΞΩΓΟΥ

Γενικά, μια πηγή με μορφή γραμμής, που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό, όταν η απόσταση μεταξύ της γραμμής και του αγωγού  $R$  είναι ίση ή μικρότερη από το μήκος της γραμμής  $L$ , απλοποιείται σε ισοδύναμη γραμμή με γομώσεις, που είναι παράλληλη στον αγωγό, βλέπε Σχήμα 4-1. Η ισοδύναμη τιμή του  $R$  ορίζεται ως εξής:

$$R = R_{gcl} / \cos B , \quad (4.1)$$

όπου

$$R_{gcl} = A + \frac{(N1-1)L1 \sin B}{2} \quad (4.2)$$

Το μήκος της γραμμής που είναι τοποθετημένες οι πηγές είναι:

$$L = (N1)(L1) \quad (4.3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις είναι:

$R_{gcl}$  = η απόσταση μεταξύ του γεωμετρικού κέντρου της γραμμής των πηγών έκρηξης και του αγωγού σε *ft*,

$A$  = η απόσταση του αγωγού από την εγγύτερη γόμωση σε *ft*,

$B$  = η γωνία μεταξύ της γραμμής των πηγών έκρηξης και του αγωγού σε μοίρες,

$N1$  = ο αριθμός των εκρηκτικών (γομώσεων) πάνω στην γραμμή, και

$L1$  = η απόσταση μεταξύ των εκρηκτικών σε *ft*.

Για το  $L$  ισχύει:

$$L = (N1)(L1) = (N1)(WI),$$

από όπου η πυκνότητα των εκρηκτικών κατά μήκος της γραμμής είναι:

$$\frac{W}{L} = \frac{(N1)(W1)}{(N1)(L1)} = \frac{W1}{L1} \quad (4.4)$$

όπου  $W1$  είναι η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης του κάθε διατρήματος. Με τις τιμές των  $R$  και  $(W/L)$ , όπως ορίζονται από τις εξισώσεις (4.1) και (4.4), οι τάσεις εκτιμώνται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.14), που υπολογίστηκε για την πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό.

Στην περίπτωση των πηγών όπου η  $R$  είναι μεγαλύτερη από το  $L$ , τότε η πηγή γραμμή που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό, μετασχηματίζεται σε ισοδύναμη σημειακή πηγή. Εδώ, το ισοδύναμο βάρος των γομώσεων είναι ίσο με :

$$W = (N1)(W1) \quad , \quad (4.5)$$

και η θέση της σημειακής πηγής είναι το γεωμετρικό κέντρο της γραμμής, συγκεκριμένα:

$$R = R_{gcl} \text{ , (σημείο) .} \quad (4.6)$$

Με αυτές τις τιμές των  $W$  και  $R$ , οι τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό εκτιμώνται με την χρήση της λύσης για την σημειακή πηγή, εξίσωση (2.75).

### 4.3 ΠΗΓΗ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΚΑΝΑΒΟΥ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΓΩΓΟ

Για σημειακές πηγές που έχουν διαταχθεί σε κánaβο όπως στα Σχήματα 4-2 και 4-3, έχει δειχθεί πειραματικά ότι ο κánaβος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια παράλληλη γραμμή που αντιστοιχεί στη πρώτη γραμμή των εκρηκτικών που τον απαρτίζει. Η γραμμή αυτή είναι ισοδύναμη σε θέση, μήκος και πυκνότητα γομώσεων με τον αρχικό κánaβο. Με βάση αυτή τη παρατήρηση, η απόσταση  $R$ , το μήκος  $L$  της ισοδύναμης πηγής με μορφή παράλληλης γραμμής, και η ισοδύναμη πυκνότητα των γομώσεων ( $W / L$ ) ορίζονται για ένα παράλληλο κánaβο, όπως στην περίπτωση της παράλληλης γραμμής. Συγκεκριμένα :

$$R = A \text{ , (γραμμή),} \quad (4.7)$$

$$L = (N1)(L1) \text{ ,} \quad (4.8)$$

$$W = (N1)(N2)(W1), \text{ και}$$

$$\frac{W}{L} = \frac{W1}{L1} \text{ ,} \quad (4.9)$$

όπου

$A$  = είναι η απόσταση από τον αγωγό της εγγύτερης σειράς των εκρηκτικών που συγκροτούν τον κánaβο σε  $ft$ ,

$N1$  = είναι ο αριθμός των ισαπεχουσών γομώσεων της πρώτης στήλης,

$N2$  = είναι ο αριθμός των ισαπεχουσών γομώσεων της πρώτης σειράς,

$L1$  = είναι η απόσταση μεταξύ των γομώσεων στην πρώτη σειρά σε  $ft$ , και

$W1$  = είναι το βάρος έκαστης γόμωσης στον κανάβο σε  $lb$ .

Πειραματικές αναλύσεις δείχνουν ότι όταν το  $R \leq 1.5L$ , τα αποτελέσματα έχουν καλή συσχέτιση με αυτά της λύσης για την πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής. Έτσι, για αυτές τις τιμές της  $R$ , για την εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.14).

Για τιμές του  $R$  μεγαλύτερες από το  $1.5L$ , όπως δείχνει το Σχήμα 4-4, ο κανάβος απλοποιείται σε μια μοναδική γόμωση, που έχει βάρος ίσο με το συνολικό βάρος των γομώσεων του κανάβου. Η θέση της γόμωσης είναι στο γεωμετρικό κέντρο του κανάβου. Με άλλα λόγια, αν η πρώτη σειρά του κανάβου απέχει από τον αγωγό περισσότερο από  $1.5L$ , το  $R$  και το  $W$  ορίζονται ως εξής:

$$R = R_{gcg} = A + \frac{(N2-1)L2}{2}, \quad (4.10)$$

και

$$W = (N1)(N2)(W1), \quad (4.11)$$

Για τις παραπάνω τιμές της  $R$  και του βάρους των γομώσεων, για τον υπολογισμό των τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό από πηγή με μορφή κανάβου, η οποία απλοποιήθηκε σε ισοδύναμη σημειακή πηγή, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.75) .

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 4.44 \times E \times \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh}R^{2.5}} \right)^{0.77}. \quad (2.75)$$

#### 4.4 ΠΗΓΗ ΕΚΡΗΞΗΣ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΚΑΝΑΒΟΥ ΠΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΖΕΙ ΓΩΝΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την περίπτωση του ορθογώνιου κανάβου, που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό, συνδυάζει τις διαδικασίες για τον παράλληλο κανάβο και την υπό γωνία πηγή με μορφή γραμμής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6, η πρώτη γραμμή του υπό γωνία κανάβου ως προς τον αγωγό γίνεται αρχική ισοδύναμη γραμμική πηγή του αρχικού που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό. Αυτή η ισοδύναμη γραμμική πηγή έχει το γεωμετρικό της κέντρο τοποθετημένο σε απόσταση  $R$  από το κέντρο της γραμμής που αντιπροσωπεύει τον αγωγό. Επίσης, η απλοποίηση προχωράει παραπέρα. Έτσι, αν η απόσταση  $R = R_{gcl}/\cos B < L$  όπου  $L$  είναι το μήκος της ισοδύναμης υπό γωνία γραμμικής πηγής (πρώτη σειρά εκρηκτικών που δημιουργούν τον κανάβο), ο κανάβος μετασχηματίζεται σε ισοδύναμη παράλληλη γραμμή. Όπως και στην περίπτωση με τον παράλληλο κανάβο, η πυκνότητα των γομώσεων ( $W/L$ ) υπολογίζεται από την πρώτη γραμμή του κανάβου. Αφού έχουν οριστεί η  $R$  και η ( $W/L$ ), οι τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό μεταφοράς από πηγή με μορφή κανάβου που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό, μπορούν να προσδιοριστούν από την λύση που αναπτύχθηκε για την:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 4.44 \times E \times \left( \frac{1.4nW / L}{\sqrt{Eh} R^{1.5}} \right)^{0.77} \quad (3.14)$$

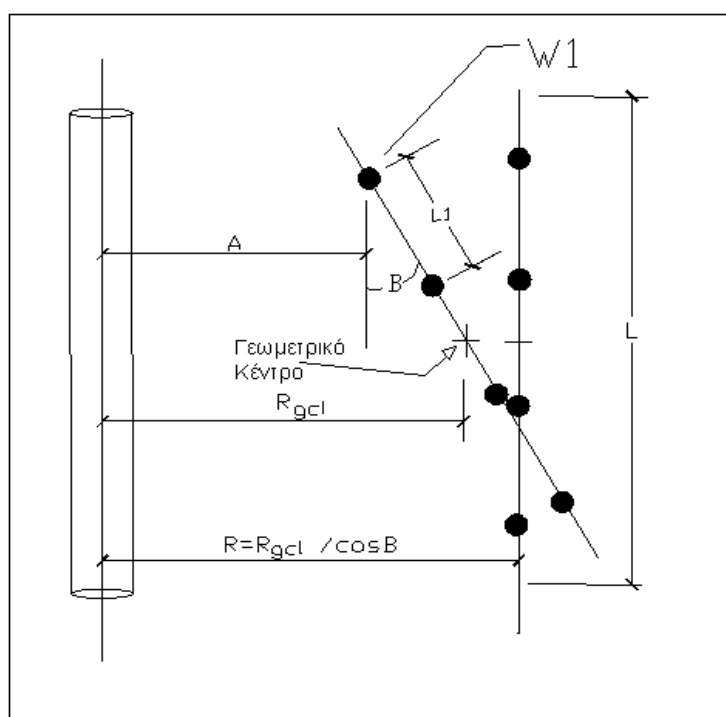
Αν η  $R = R_{gcl}/\cos B > 1.5 L$ , τότε ο κανάβος μετασχηματίζεται σε μια ισοδύναμη σημειακή πηγή. Όπως και στην περίπτωση με τον παράλληλο κανάβο, η  $R$  όπως ορίστηκε από την εξίσωση (4.1), αντιστοιχεί στην ισοδύναμη παράλληλη γραμμή που αντιπροσωπεύει τον κανάβο με στροφή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6, η ισοδύναμη σημειακή γόμωση  $W$  θα έχει βάρος ίσο με το άθροισμα των βαρών των γομώσεων που δημιουργούν τον κανάβο. Η απόσταση  $R_{gcg}$  θα είναι ίση με την απόσταση μεταξύ του κέντρου του αγωγού και του γεωμετρικού κέντρου του κανάβου. Η απόσταση αυτή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R_{gcg} = 3 \left( \frac{L_2}{2} \right) + R_{gcl} \quad (4.15)$$

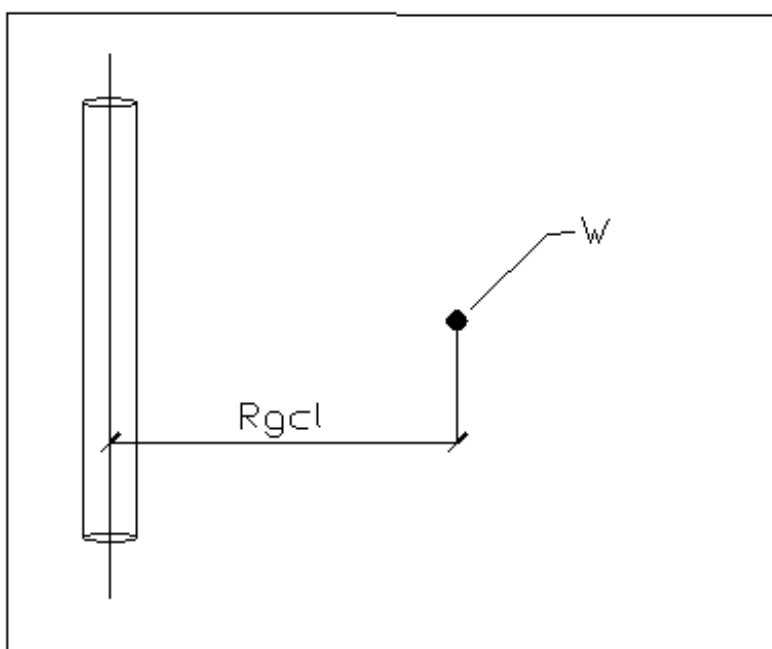


Σημειώνεται πως αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όχι μόνο για τον υπολογισμό της  $R_{gcl}$  μιας ισοδύναμης σημειακής πηγής από ένα κανάβο που είναι στραμμένος ως προς τον αγωγό, αλλά και για ισοδύναμη σημειακή πηγή που προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή με μορφή κανάβου ή γραμμής παράλληλης ή υπό γωνία ως προς τον αγωγό.

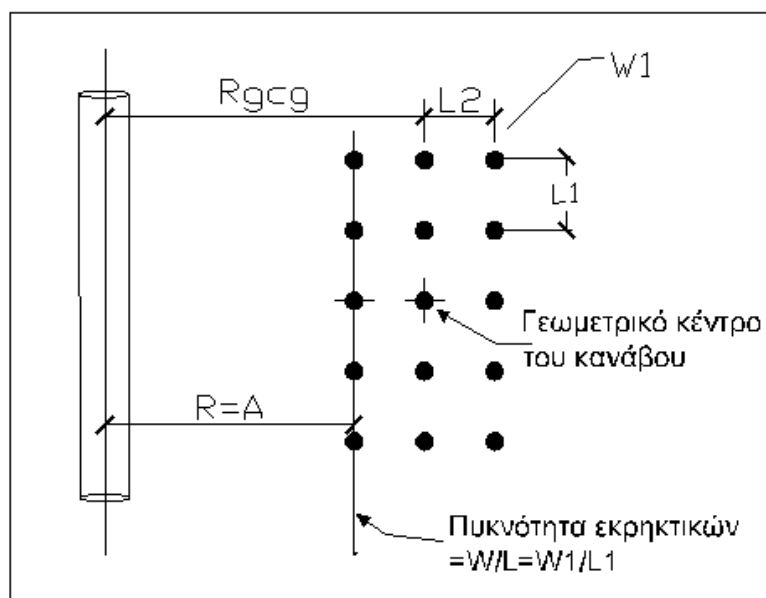
Με το  $W$  και  $R$ , όπως ορίστηκαν, για οποιοδήποτε κανάβο που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό, ο οποίος έχει απλοποιηθεί σε μια ισοδύναμη σημειακή πηγή, οι τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό μπορούν να εκτιμηθούν από την εξίσωση (2.75).



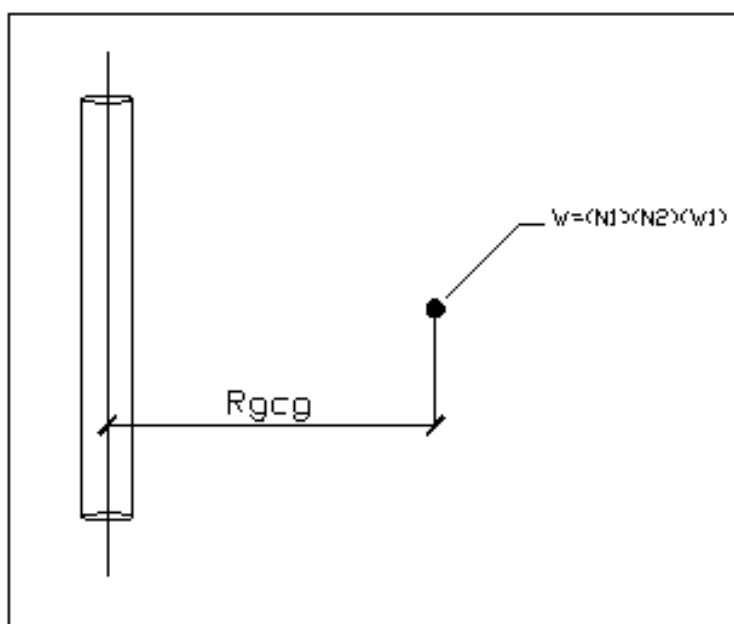
**Σχήμα 4-1: Η αντιστοιχία της πηγής με μορφή γραμμής που σχηματίζει γωνία ως προς τον αγωγό με την ισοδύναμη της παράλληλη γραμμή όταν  $R \leq L$**



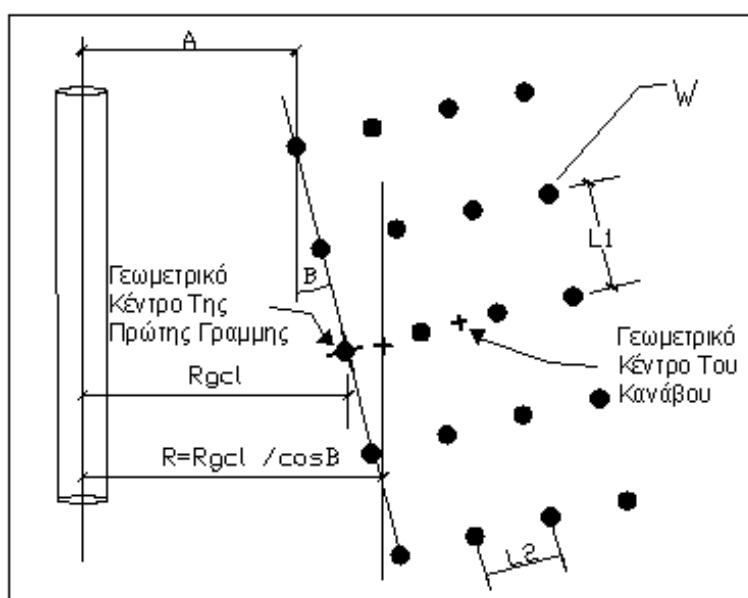
Σχήμα 4-2: Η ισοδύναμη σημειακή πηγή στην περίπτωση της γραμμικής πηγής με κλίση όταν  $R > L$



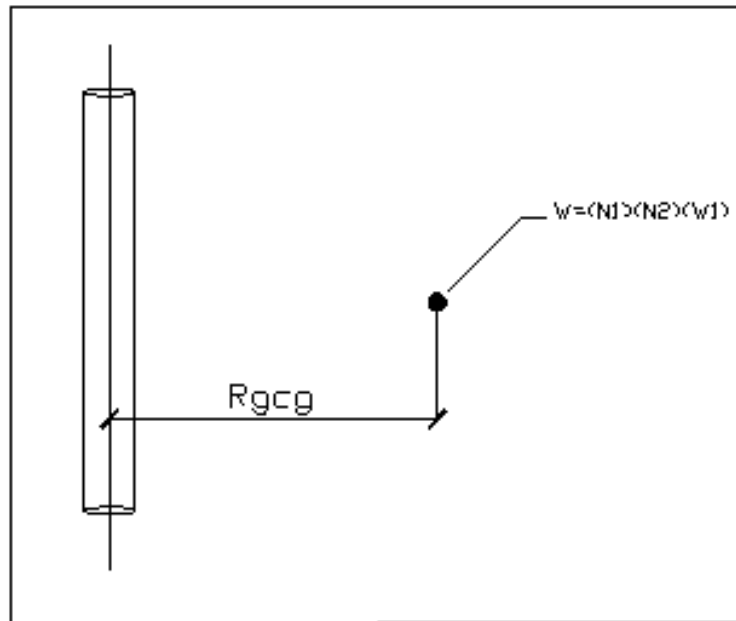
Σχήμα 4-3: Η αντιστοιχία του παράλληλου ορθογωνίου κανάβου στον αγωγό σε ισοδύναμη παράλληλη γραμμή όταν  $R \leq 1.5L$



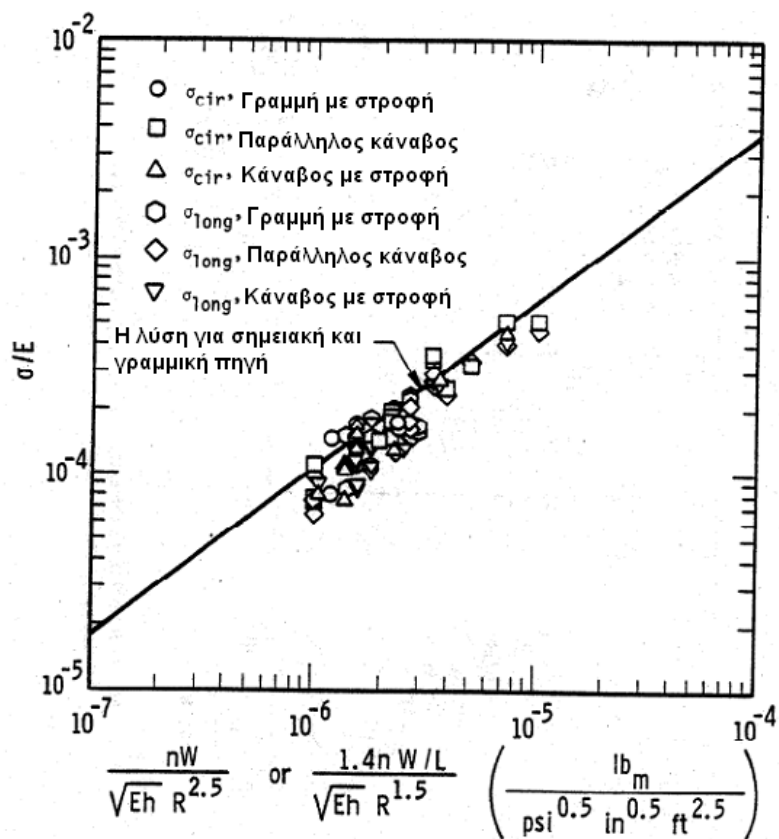
Σχήμα 4-4: Η ισοδύναμη σημειακή πηγή στην περίπτωση του κανάβου όταν  $R > 1.5$



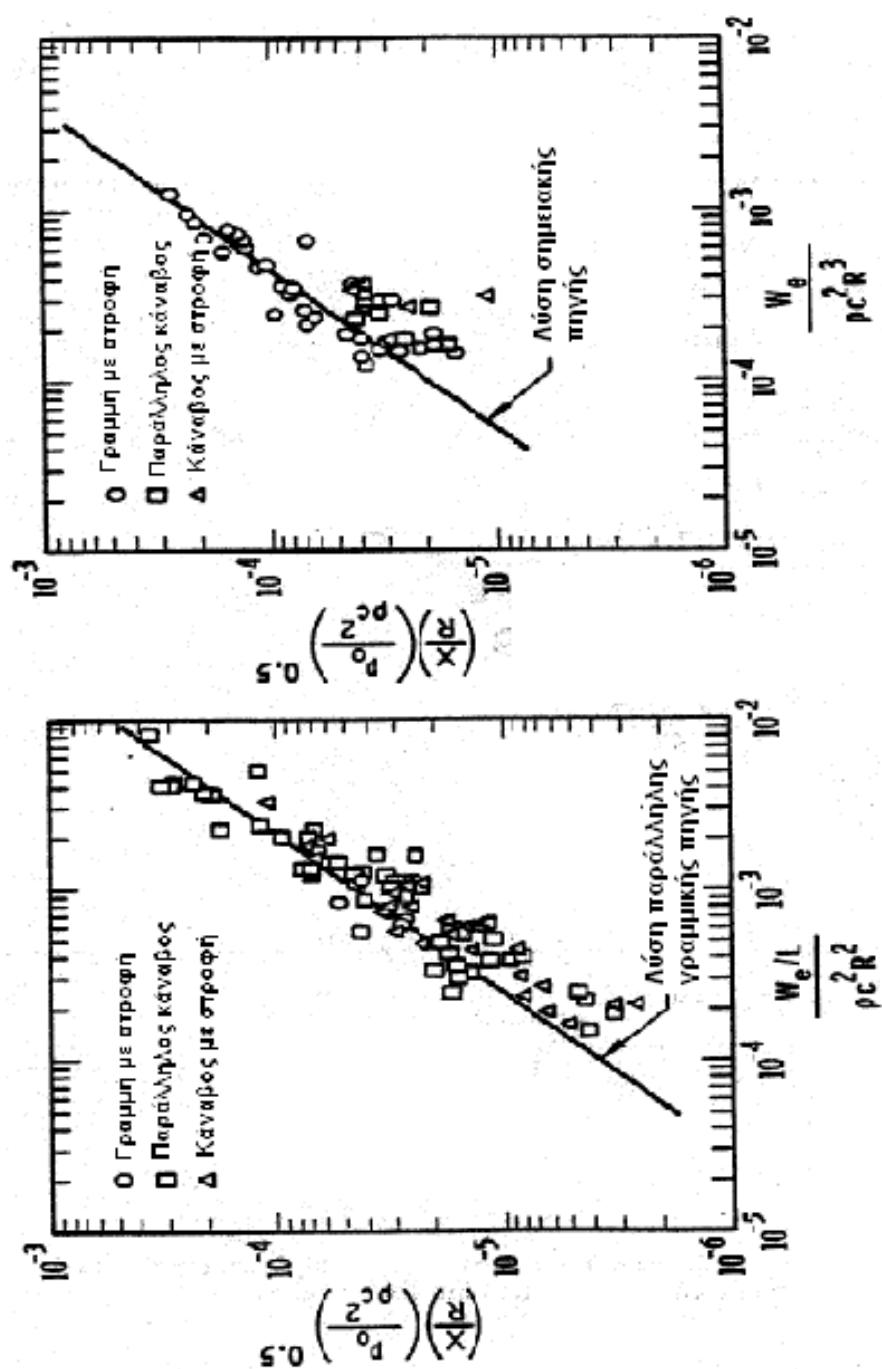
Σχήμα 4-5: Η αντιστοιχία του ορθογωνίου κανάβου με κλίση σε ισοδύναμη παράλληλη γραμμή όταν  $R \leq 1.5 L$



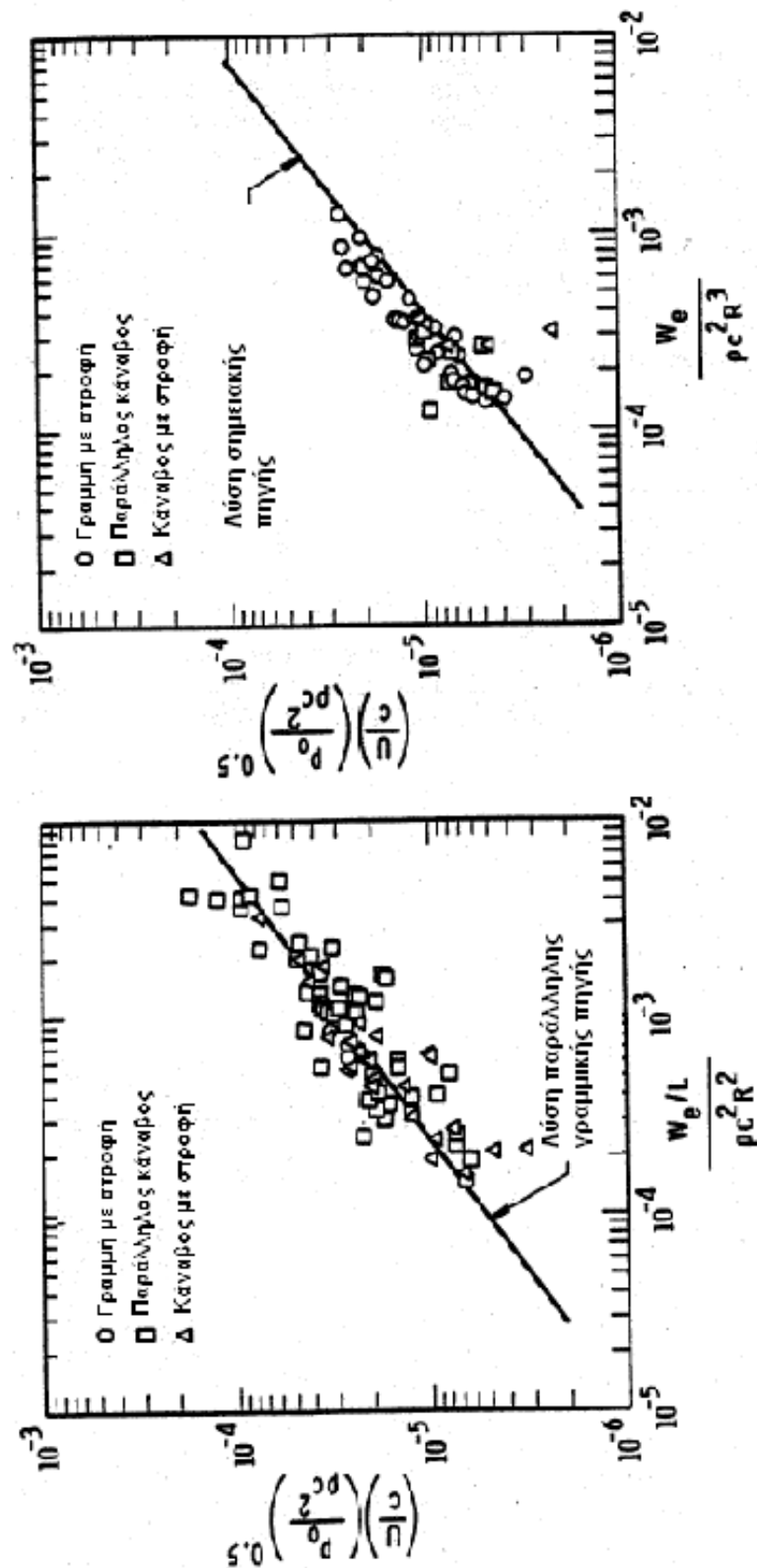
Σχήμα 4-6: Η αντιστοιχία του ορθογωνίου κανάβου με κλίση σε ισοδύναμη σημειακή πηγή όταν  $R > 1.5 L$



Σχήμα 4-7: Συγκριση μεταξύ των τάσεων στον αγωγό από πηγές έκρηξης σύνθετης γεωμετρίας, με την λύση για την πηγή έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής



Σχήμα 4-8: Ακτινωτές μετατοπίσεις από πηγές έκρηξης σύνθετης γεωμετρίας, οι οποίες αντιμετωπίζονται ως πηγές έκρηξης με μορφή παράλληλης γραμμής ή σημείου



Σχήμα 4-9: Οι ταχύτητες των υλικών σωματιδίων του εδάφους που προκαλούνται από πηγές έκρηξης με πολύπλοκη γεωμετρία, οι οποίες αντιμετωπίζονται ως ισοδύναμες σημειακές πηγές ή πηγές με μορφή παράλληλης γραμμής



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ**

#### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

Οι εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη των τάσεων που αναπτύσσονται σε έναν αγωγό μεταφοράς από κοντινές πυροδοτήσεις στηρίζονται σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ομοιόμορφα εδάφη, η εφαρμογή τους σε πυροδοτήσεις σε περιπτώσεις βράχων δεν είχε επιβεβαιωθεί. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επέκταση της μεθόδου Esparza, στην περίπτωση βραχώδους εδάφους. Η επέκταση αυτή έγινε το 1981 στα πλαίσια σχετικού ερευνητικού προγράμματος που περιελάμβανε θεωρητικό και πειραματικό έργο σε φυσική κλίμακα.

#### **5.2 Η ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ ΣΕ ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ**

##### **5.2.1 Το πειραματικό έργο για την ανάπτυξη των εξισώσεων**

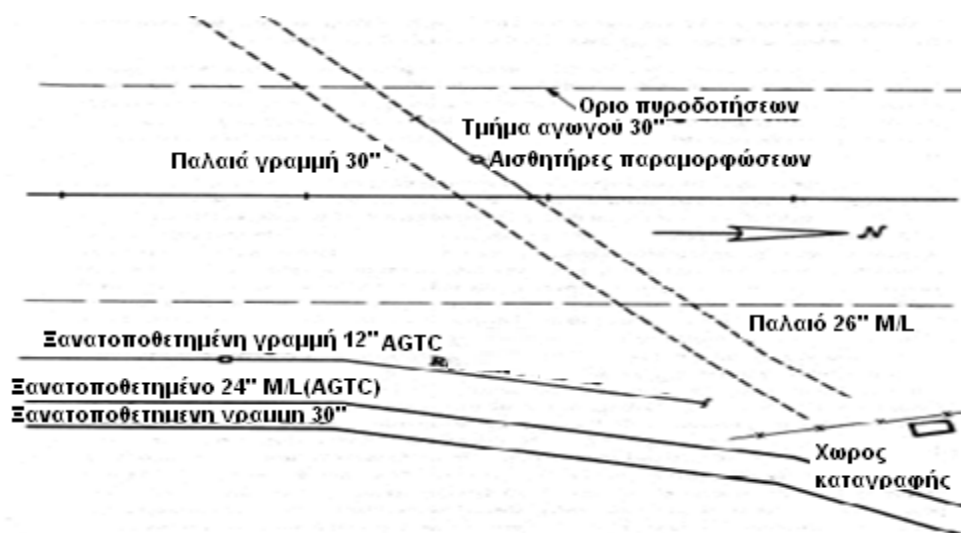
Για την επέκταση των εξισώσεων που αναπτύχθηκαν σε έδαφος στην περίπτωση του βράχου, οι Esparza, et al., (1981), εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων πεδίου, που περιγράφονται παρακάτω. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν εικοσιένα πυροδοτήσεις. Οι περισσότερες από τις μεγαλύτερες τιμές των τάσεων, προήλθαν από τα πειράματα σε τοποθεσία που απείχε 80 ft από αγωγό των 30-in, που ήταν τοποθετημένος σε βάθος 3 ft. Αυτή η τοποθεσία ήταν σε ένα όρυγμα, στο οποίο τοποθετήθηκε και ένα ευθύγραμμο τμήμα



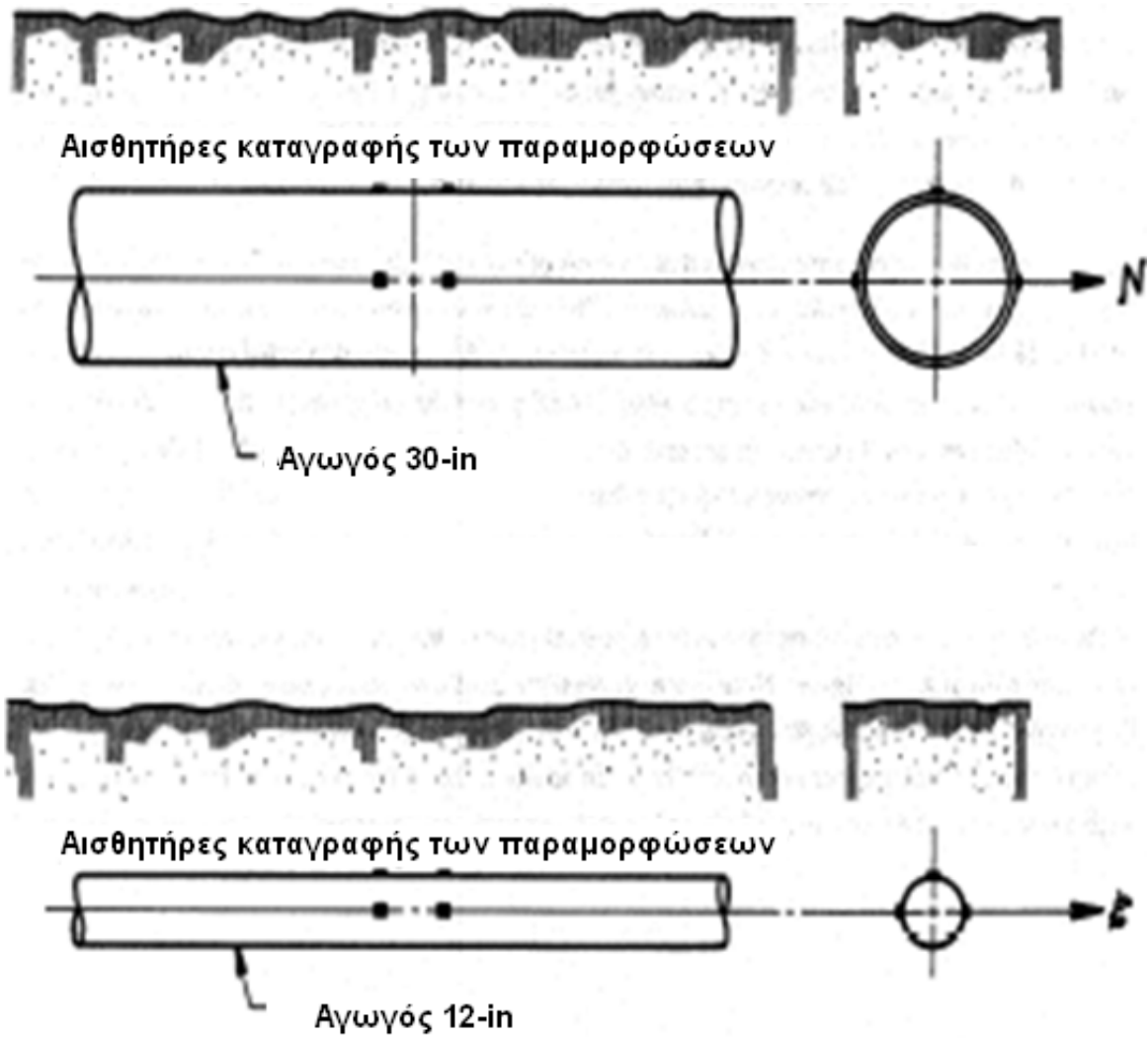
ενός αγωγού των 12-in, μήκους 24.38 m, καθώς και ένας τμήμα αγωγού των 26- in. Το όρυγμα είχε κατασκευαστεί σε βραχώδη μάζα και τα πλαϊνά κενά γεμίστηκαν με το έδαφος που εξήχθη κατά την εκσκαφή, και με τεμάχια βράχου. Η τοποθεσία διεξαγωγής των πειραμάτων και τα τμήματα των αγωγών, φαίνονται στο Σχήμα 5-1.

Για την τοποθέτηση των αισθητήρων στον αγωγό, σκάφτηκαν τρύπες με σχήμα καμπάνας από την επιφάνεια του εδάφους ως τον αγωγό. Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων, οι τρύπες γεμίστηκαν με άμμο, λίγο έδαφος από την εκσκαφή, και σπασμένα τεμάχια βράχου. Οι αισθητήρες αυτοί ήταν για την καταγραφή των παραμορφώσεων στον αγωγό, και ο προσανατολισμός τους ήταν τέτοιος, ώστε να καταγράφουν τιμές κατά την διαμήκη και εφαπτομενική κατεύθυνση, Σχήμα 5-2.

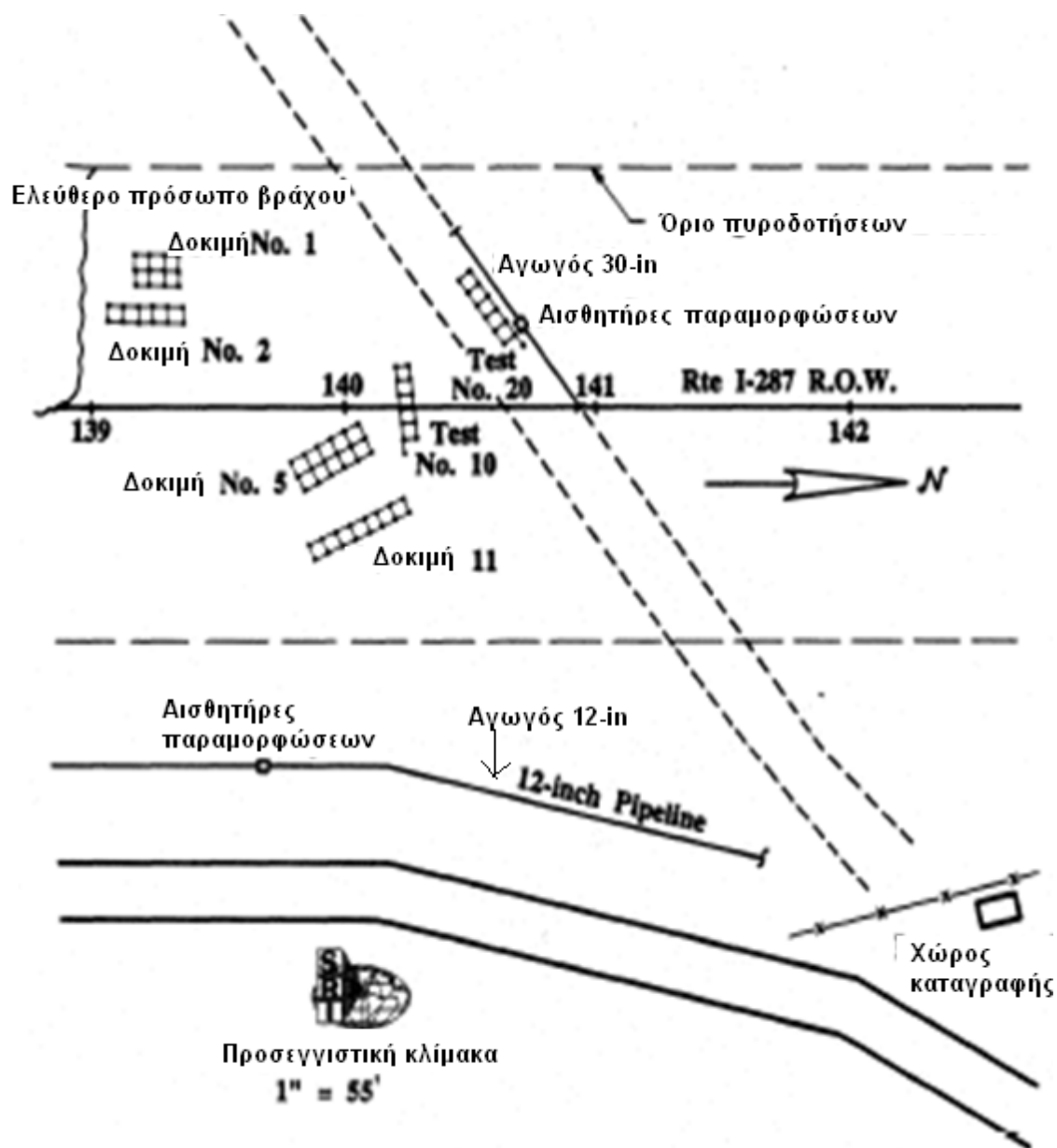
Οι πηγές έκρηξης αποτελούνταν από εκρηκτικά τα οποία ήταν τοποθετημένα σε διατρήματα που σχημάτιζαν κάναβο. Κάθε κάναβος αποτελούνταν από έντεκα έως δεκαοχτώ διατρήματα βάθους 5-6 m και διαμέτρου 7.5 cm. Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων ήταν 1.8 m και η μέγιστη ποσότητα των εκρηκτικών υλών ανά χρόνο επιβράδυνσης ήταν μεταξύ 6.8 και 9.1 Kg. Στο Σχήμα 5-3, φαίνεται η διάταξη των εκρηκτικών πηγών ως προς τον αγωγό.



**Σχήμα 5-1: Η τοποθεσία διεξαγωγής των πειραμάτων**



Σχήμα 5-2: Οι θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων που καταγράφουν τις τάσεις στον αγωγό



Σχήμα 5-3: Διάταξη των εκρηκτικών πηγών ως προς τον αγωγό

### 5.2.2 Οι εξισώσεις για το βραχώδες έδαφος

Συγκρίνοντας τις τιμές που μετρήθηκαν στα πειράματα με την εξίσωση που προέκυψε για την τάση που αναπτύσσεται στον αγωγό από πυροδοτήσεις σε έδαφος, παρατηρείται ότι η εξίσωση για το έδαφος αποτελεί ένα άνω όριο για τις διαμήκεις και τις εφαπτομενικές τάσεις, Σχήμα 5-4. Η διασπορά των τιμών είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις τιμές που προβλέφθηκαν για το έδαφος. Στο Σχήμα 5-5, φαίνονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα που έγιναν από τον Esparza (1984) στο εργαστήριο. Οι συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων αυτών ήταν ελεγχόμενες, σε αντίθεση με αυτές που ίσχυαν στα πειράματα πεδίου σε βράχο, όπου η γεωλογία και η τοπογραφία του εδάφους παρουσίαζαν ποικιλία. Στα πειράματα πεδίου, τα βάρη των γομώσεων ήταν δύσκολο να επαληθευτούν, τα διάφορα φόρτη και οι αποστάσεις ήταν σχεδόν μέσα στα νόμιμα όρια, και τα ελεύθερα πρόσωπα των διατηρημάτων, άλλοτε ήταν παράλληλα και άλλοτε σχημάτιζαν γωνίες ακόμα και 90 μοίρες ως προς τον αγωγό.

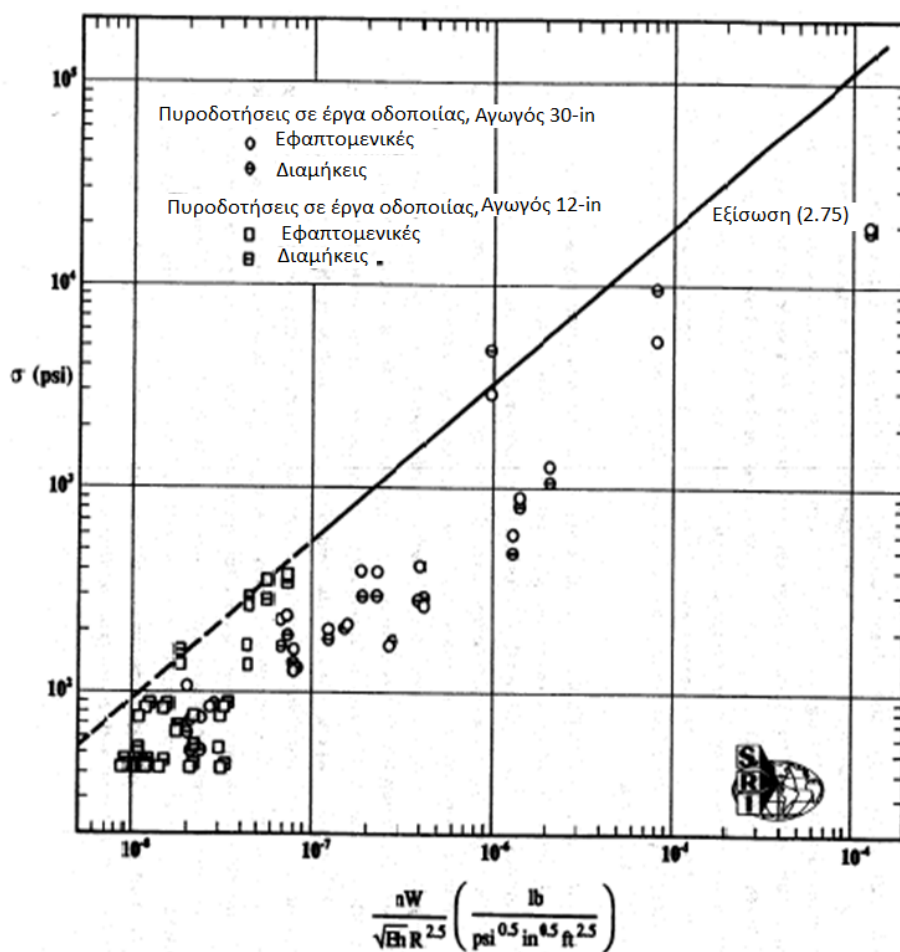
Στην περίπτωση του βράχου, αναπτύχθηκαν στον αγωγό μικρότερες τάσεις σε σύγκριση με το έδαφος. Οι λόγοι ήταν οι εξής: α) οι αποστάσεις μεταξύ του αγωγού και των εκρηκτικών ήταν μεγαλύτερες, και β) ένα μεγάλο μέρος της απελευθερούμενης ενέργειας δαπανείται στην θραύση του βράχου.

Το κύμα διαδίδεται στο βράχο με την ταχύτητα του ήχου μέσα στα υλικά. Οι θραύσεις και οι ρωγμές που δημιουργούνται από την έκρηξη διαδίδονται με ταχύτητα που είναι το 38% της ταχύτητας του ήχου. Οι πιο αντιπροσωπευτικές επιβραδύνσεις για τρία ήδη βράχων προσδιορίζονται ως εξής:

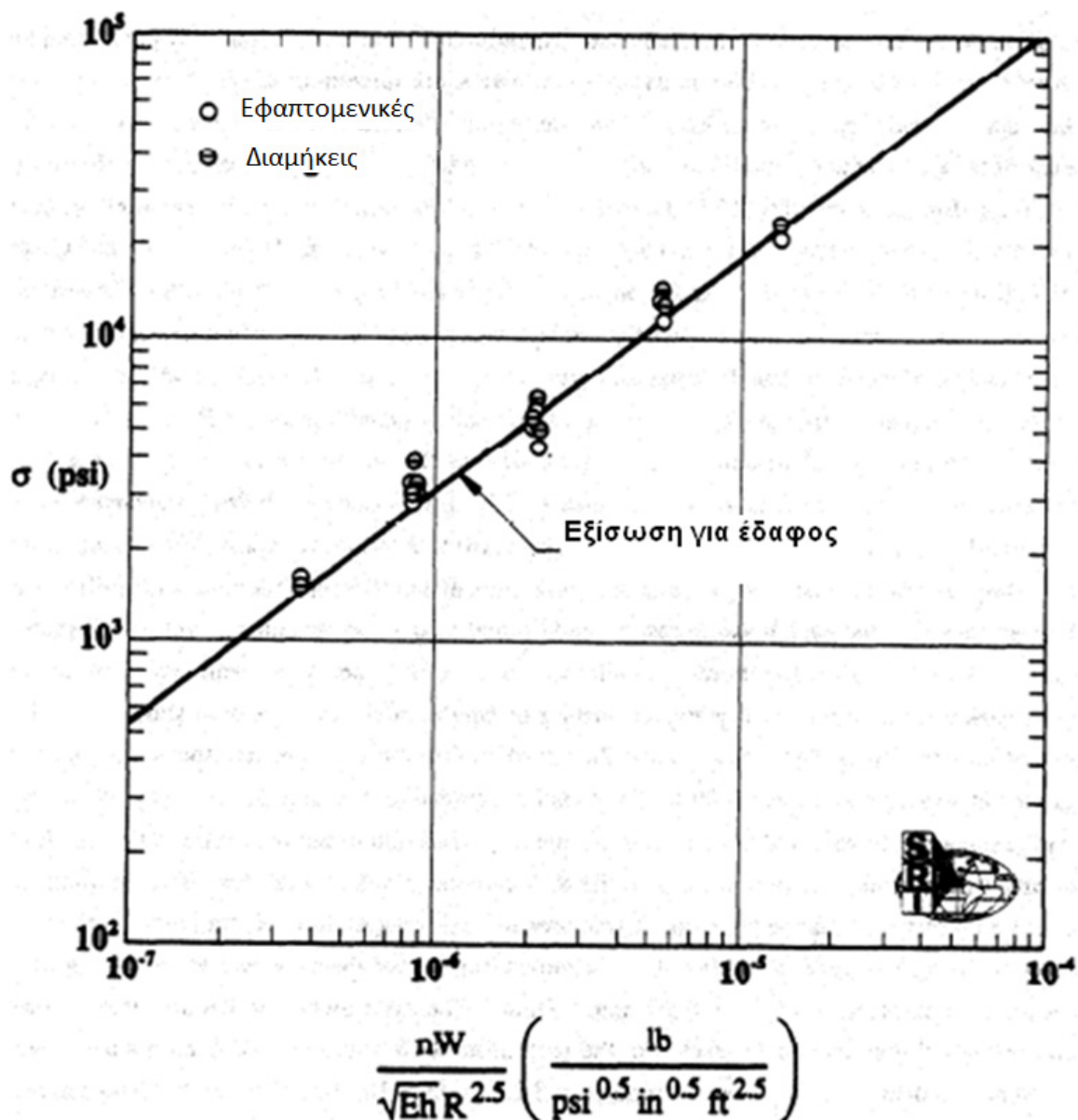
- 14-45 msec, για σκληρό βράχο (3960 m/sec ταχύτητας του ήχου)
- 20-50 msec, για μαλακότερο βράχο (2987 m/sec ταχύτητας του ήχου)
- 35-75 msec, για αιχμηρό βράχο (2011 m/sec ταχύτητας του ήχου)

Αν η χρήση των επιβραδύνσεων μπορεί να μειώσει τις τάσεις που αναπτύσσονται σε έναν υπόγειο αγωγό από πυροδότηση, εξαρτάται από την δύναμη και το μήκος του σεισμικού κύματος, από τον χρόνο αντίδρασης του αγωγού ταυτόχρονα με το έδαφος που τον περιβάλλει, από τις διαφορετικές συχνότητες και από τους τρόπους απόκρισης του αγωγού.

Όταν η πυροδότηση γίνεται σε βραχώδες έδαφος, το κενό του ορύγματος μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένος ο αγωγός είναι συνήθως καλυμμένο με έδαφος. Συνεπώς, το σεισμικό κύμα μεταβιβάζεται στο έδαφος του ορύγματος, και στη συνέχεια στον αγωγό, δηλαδή, δεν μεταδίδεται απευθείας το σεισμικό κύμα από τον βράχο στον αγωγό. Επίσης, η καθυστέρηση μεταξύ των γομώσεων ήταν της τάξεως των 25 *millisecond*.



Σχήμα 5-4: Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα στο βράχο με τα αποτελέσματα των εξισώσεων που αποκτήθηκαν για το έδαφος



Σχήμα 5-5: Σύγκριση των αποτελεσμάτων από πειράματα στο εργαστήριο με τα αποτελέσματα των εξισώσεων που εξήχθησαν

Από τον Esparza, et al. (1981), αναπτύχθηκαν οι γενικές εξισώσεις για την μέγιστη μετατόπιση και την ταχύτητα στο έδαφος:

$$\frac{X}{R} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.0373 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{1.060} \quad (2.10)$$

$$\frac{U}{C} \left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = 0.00489 \left( \frac{w_e}{\rho c^2 R^3} \right)^{0.790} \quad (2.11)$$

Αυτές οι εξισώσεις όταν χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες τιμές για τα  $\rho$  και  $c$ , μπορούν να δώσουν εκτιμήσεις των εδαφικών κινήσεων και για άλλου τύπου υλικά.

Στο έδαφος όπου  $\rho = 100 \text{ lb/ft}^3$ ,  $c = 1000 \text{ ft/sec}$ , η μέγιστη ακτινική ταχύτητα ταλάντωσης του σωματιδίου του εδάφους είναι:

$$U = 1280 \left( \frac{R}{W^3} \right)^{0.79}, \quad (5.0)$$

όπου,

$U$  = είναι η μέγιστη ταχύτητα υλικού σωματιδίου του εδάφους σε  $\text{ft/sec}^2$ ,

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ αγωγού και της σημειακής πηγής σε  $\text{ft}$ , και

$W$  = είναι το ισοδύναμο βάρος της γόμωσης ως προς την ANFO 94/6 σε  $\text{lb}$ .

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί για την ταχύτητα ταλάντωσης. Ο Dupont (1980) παρουσίασε μια σχέση, που αναπτύχθηκε από το γραφείο των ορυχείων των ΗΠΑ για επιφανειακή ανατίναξη σε βράχο. Η σχέση αυτή έχει την μορφή:

$$U = 160 \left( \frac{R}{W^{1/2}} \right)^{-1.6} \quad (5.1)$$

Σύμφωνα με τον Dupont (1980), η εξίσωση αυτή ισχύει μόνο για προγραμματισμένες πυροδοτήσεις. Όταν η εργασία της πυροδότησης έχει ξεκινήσει και καταγράφονται ενεργά σεισμικά δεδομένα, ίσως χρειαστεί να γίνουν μετατροπές.

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης ταχύτητας ταλάντωσης των σωματιδίων του εδάφους, μια άλλη εξίσωση που έχει προταθεί είναι η παρακάτω:

$$U = KW^{\beta_1} R^{\beta_2} \quad (5.2)$$

όπου

$U$  = είναι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ή της μετατόπισης,

$\beta_1, \beta_2$  = είναι σταθεροί συντελεστές,

$W$  = είναι το βάρος της γόμωσης, και

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ αγωγού και γόμωσης.

Όταν μια πυροδότηση γίνεται σε ομοιόμορφο βραχώδες έδαφος, οι εξισώσεις (2.10) και (2.11), που αναπτύχθηκαν από τους Esparza, et al. (1981), όταν χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες τιμές για τα  $p$  και  $c$ , δίνουν τις εδαφικές μετατοπίσεις. Για παράδειγμα, για τον βράχο όπου  $p = 150 \text{ lb/ft}^3$  και  $c = 10,000 \text{ ft/sec}$ , προκύπτει :

$$U = 2990 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-0.37} \quad (\text{βράχος}) \quad \text{για } R/W^{1/3} < 20 \quad (5.3)$$

Στο βιβλίο των Dwding's (1985), παρέχεται η μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης του σωματιδίου του εδάφους, που προέκυψε από πειράματα σε λατομεία και από άλλα πειράματα πυροδότησης, συναρτήσει της ανηγμένης απόστασης. Οι εξισώσεις των οριακών τιμών της μέγιστης ταχύτητας ταλάντωσης του σωματιδίου του εδάφους είναι:

$$U = 6,000 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.8} \quad \text{για } R/W^{1/3} < 10, \quad (5.4)$$



$$U = 360 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.6} \quad \text{για } R/W^{1/3} > 10. \quad (5.5)$$

Οι Dwiding (1985) για τον προσδιορισμό των παραπάνω εξισώσεων, βασίστηκαν σε δώδεκα μελέτες πεδίου που συμπεριλάμβαναν λατομεία, τούνελ, και άξονες πυροδότησης. Για τον βράχο, όπου οι τιμές των  $\rho$  και  $c$  είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της σχέσης (5.3), προκύπτει:

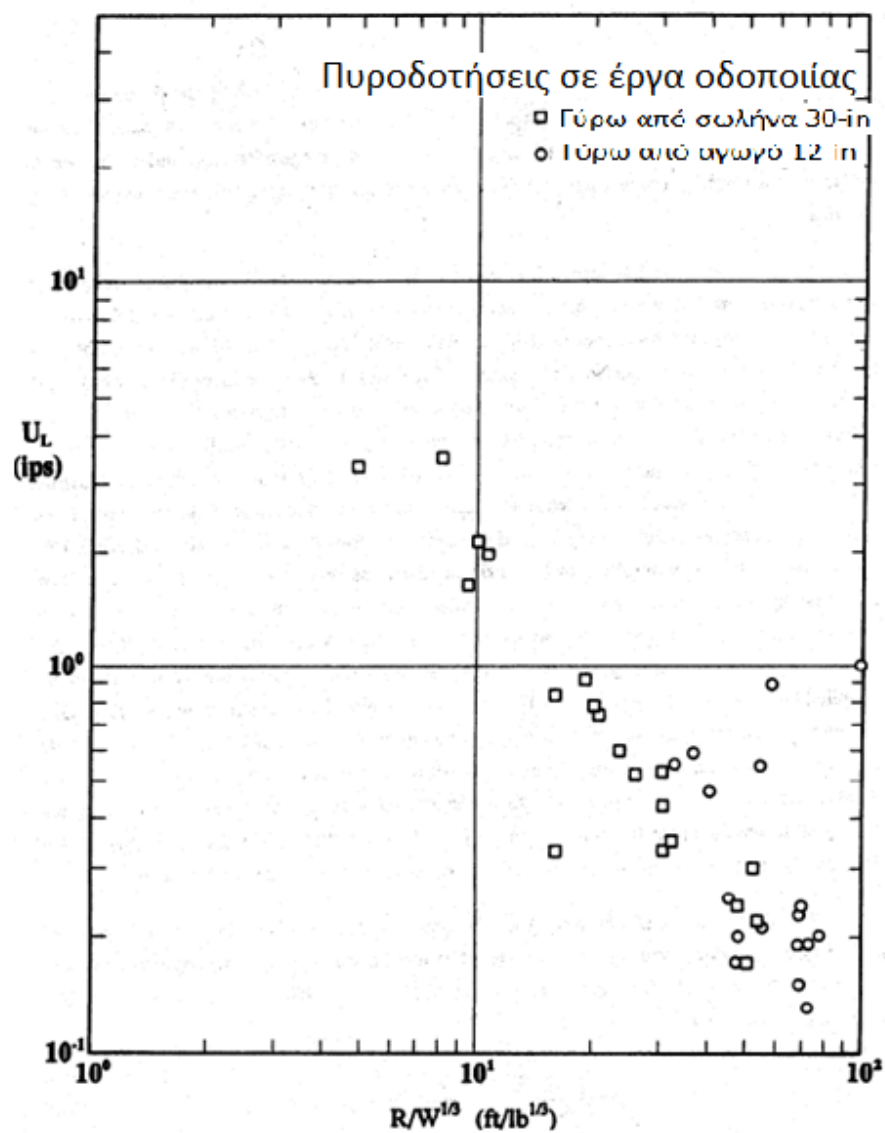
$$U = 198 \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.45}. \quad (5.6)$$

Αυτή η εξίσωση είναι παρόμοια με την σχέση (5.5), που είναι κατάλληλη για ανηγμένες αποστάσεις μεγαλύτερες από  $10 \frac{\text{ft}}{\text{lb}^{1/3}}$ .

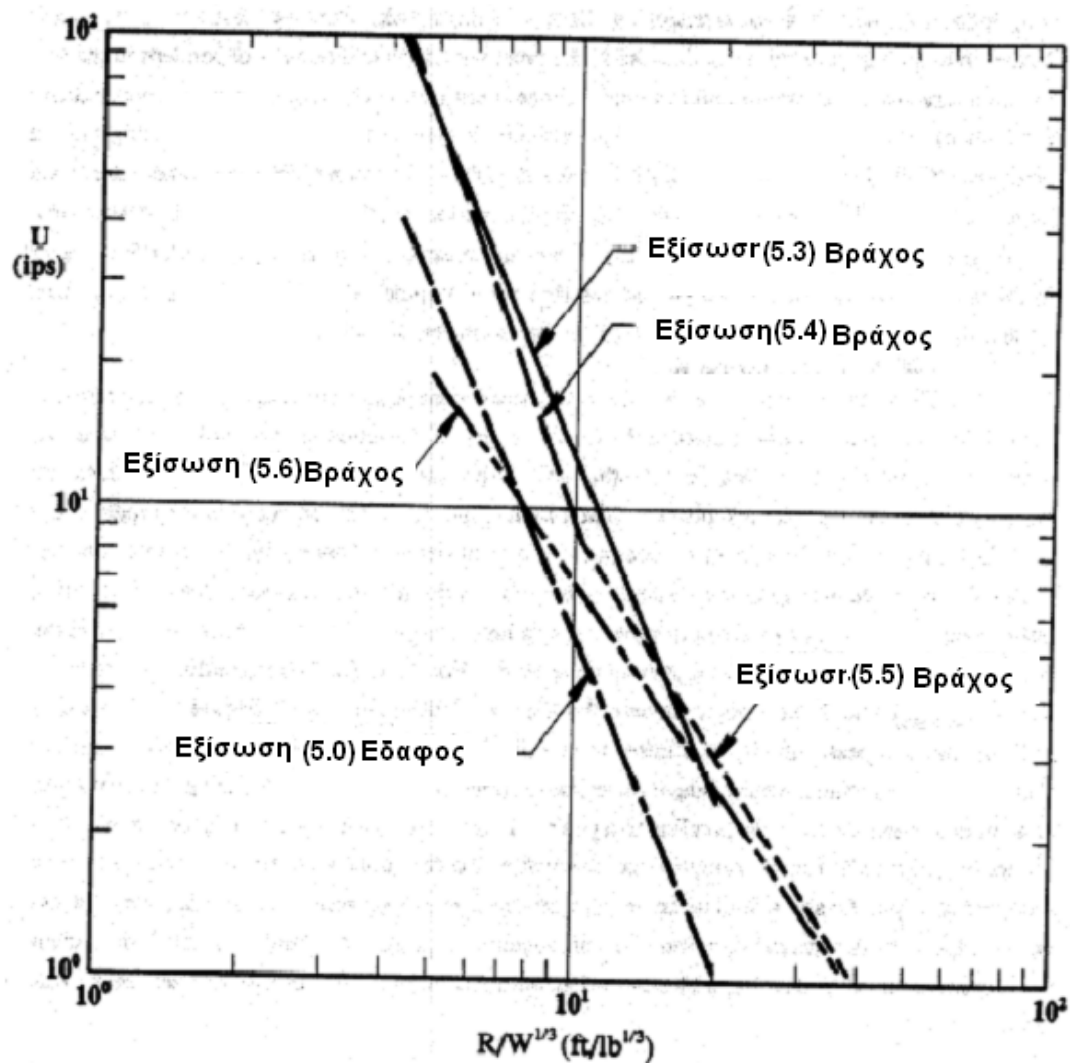
Οι εξισώσεις (2.10) και (2.11) δίνουν την μετατόπιση και την μέση διαμήκη ταχύτητα στην περίπτωση ομογενούς γεωλογίας του εδάφους ή του βράχου. Στην περίπτωση που ο αγωγός είναι θαμμένος σε όρυγμα στον βράχο, όπου το πίσω γέμισμα είναι έδαφος, οι μέγιστες ταχύτητες εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση των δυο μέσων. Επίσης, οι εδαφικές μετατοπίσεις που υπολογίζονται από αυτές τις εξισώσεις πιθανών να διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές μετρήσεις.

Στο σχήμα 5-8, φαίνεται το διάγραμμα των μέγιστων διαμήκων ταχυτήτων. Παρατηρείται ότι, τα δεδομένα από τα πειράματα παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη διασπορά. Το Σχήμα 5-9, φαίνονται οι τιμές της διαμήκου ταχύτητας ως προς τις τιμές των τάσεων στον αγωγό που προήλθαν από πειράματα του Esparza (1985). Αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι μια μέγιστη ταχύτητα των σωματιδίων σε αυτό το ομοιόμορφο έδαφος με τιμή 2 in/sec, η οποία είναι ένας σύνηθες περιορισμός που χρησιμοποιείται για κτίρια πάνω από το έδαφος, θα αναπτύξει στον αγωγό μέγιστη τάση ίση με 2500 psi. Σε άλλη περίπτωση, για την ίδια ταχύτητα οι τιμές της τάσης μπορούν να είναι σημαντικά υψηλότερες.

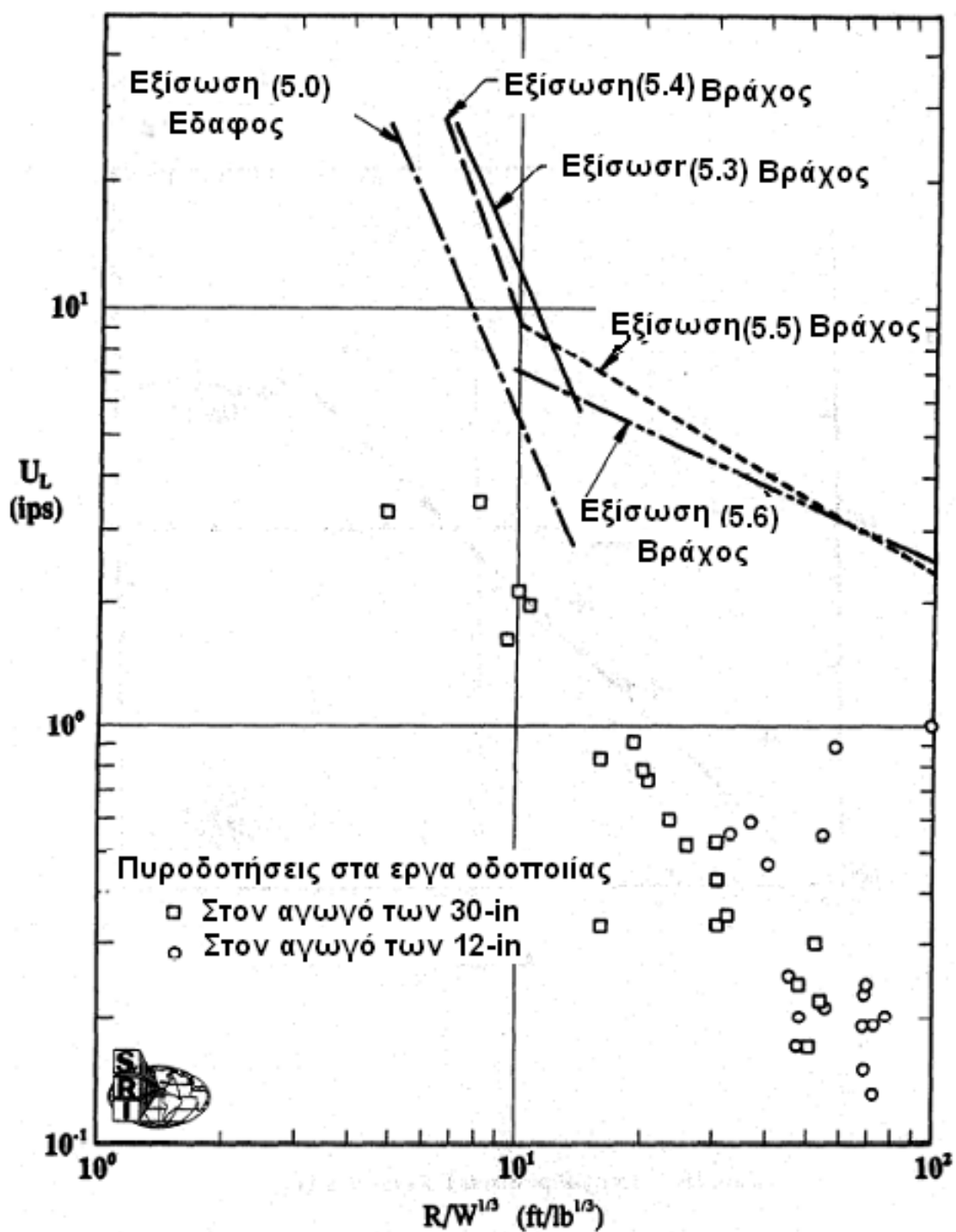
Προκειμένου οι τιμές της τάσης που προέκυψαν σε συγκεκριμένη τοποθεσία να είναι αποδεκτές, απαιτείται να εξεταστούν και να αναλυθούν η συνολική κατάσταση των τάσεων στον αγωγό και οι φυσικές συνθήκες που επικρατούν.



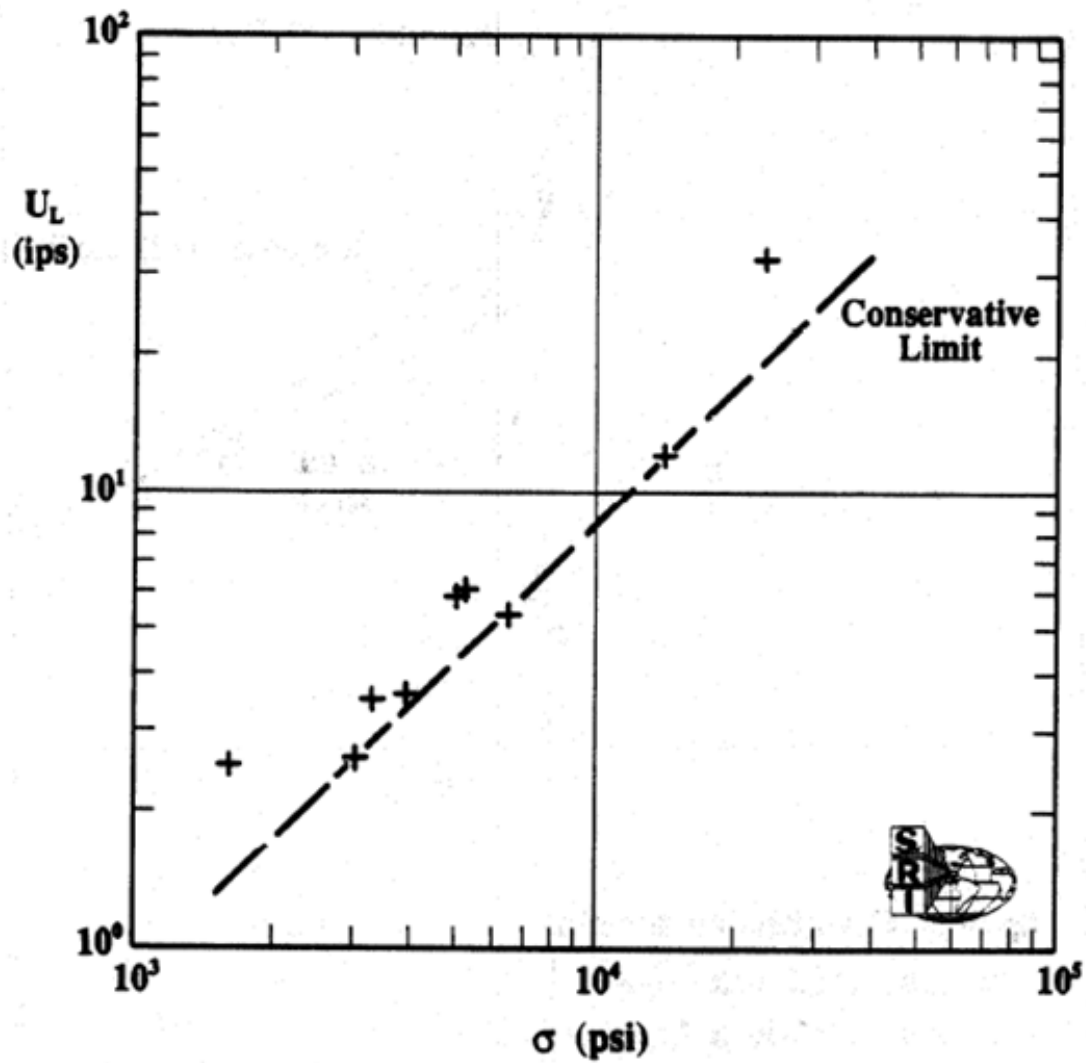
Σχήμα 5-6: Διαμήκειες ταχύτητες υλικού σωματιδίου του εδάφους πάνω από τον αγωγό



Σχήμα 5-7: Σύγκριση των εξισώσεων της ταχύτητας δόνησης των σωματιδίων για έδαφος και για βράχο



Σχήμα 5-8: Σύγκριση των δεδομένων πυροδότησης στον βράχο που μετρήθηκαν στο έδαφος με διάφορες εξισώσεις



Σχήμα 5-9: Οι ταχύτητες και οι τάσεις στον αγωγό από πειράματα εδάφους

### 5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΒΡΑΧΟ ΜΕ ΟΡΥΓΜΑ

#### 5.3.1 Προσδιορισμός του κριτηρίου ασφάλειας

Για πολλά χρόνια σε αγωγούς, που βρίσκονται σε λειτουργία χρησιμοποιήθηκαν κριτήρια που βασίζονταν σε δονήσεις. Οι δονήσεις αυτές δεν έπρεπε να υπερβαίνουν το όριο των 2 in/sec για κτίρια, που βασίζονται στα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τους Nicholls, et al., (1971).

Σε πολλές περιπτώσεις οι κατασκευαστές είχαν προβλήματα στον τεμαχισμό του βράχου. Επίσης, οι προσπάθειες συσχέτισης του βάρους των γομώσεων με τη μέγιστη ταχύτητα δεν είχαν αποτέλεσμα. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο να αναπτυχθούν νέα κριτήρια. Τα νέα κριτήρια, που θα προσδιορίζονταν, θα βασιζόντουσαν στο εύρος των τιμών των τάσεων από τις πυροδοτήσεις, εξετάζοντας τις συνθήκες λειτουργίας του αγωγού. Έτσι, διεξάχθηκε μια σειρά προκαταρκτικών πειραμάτων με σκοπό να συλλεχθούν οι τιμές των τάσεων που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του νέου κριτηρίου. Στο Σχήμα 5-10, φαίνεται η διάταξη των διάφορων συντελεστών των προκαταρκτικών πειραμάτων. Η περίπτωση της πυροδότησης ήταν έκρηξη σε βράχο με όρυγμα.

#### 5.4 Ανάλυση των αποτελεσμάτων από πυροδοτήσεις σε βράχο με όρυγμα

Σε όλα τα πειράματα οι αποστάσεις μεταξύ των εκρηκτικών και του αγωγού κυμαίνονταν από 4.5m έως 7.5 m, περίπου. Έτσι, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει προσπάθεια γενίκευσης των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, με σκοπό να προσδιοριστούν σχέσεις που να ικανοποιούν μεγαλύτερο εύρος τιμών. Όπως δείχνεται στο Σχήμα 5-4, όλα σχεδόν τα αποτελέσματα από τα πειράματα βρίσκονταν κάτω από τη γραφική παράσταση της σχέσης (2.75) του δεύτερου κεφαλαίου. Γι αυτό το λόγο, αν κάποιος έπρεπε να χρησιμοποιήσει τη σχέση (2.75) για να υπολογίσει τις μέγιστες τάσεις, σε περίπτωση πυροδότησης με όρυγμα παρόμοιας με αυτή των δοκιμών, για τις τιμές που είναι μεγαλύτερες από αυτές που προβλέφθηκαν, θα χρειαζόταν ένας συντελεστής ασφαλείας ίσος με 2. Αυτός ο συντελεστής θα έκανε τη σχέση (2.75) πιο συντηρητική, αλλά πιθανόν να διεύρυνε την εφαρμοσιμότητα της σε μεγαλύτερο

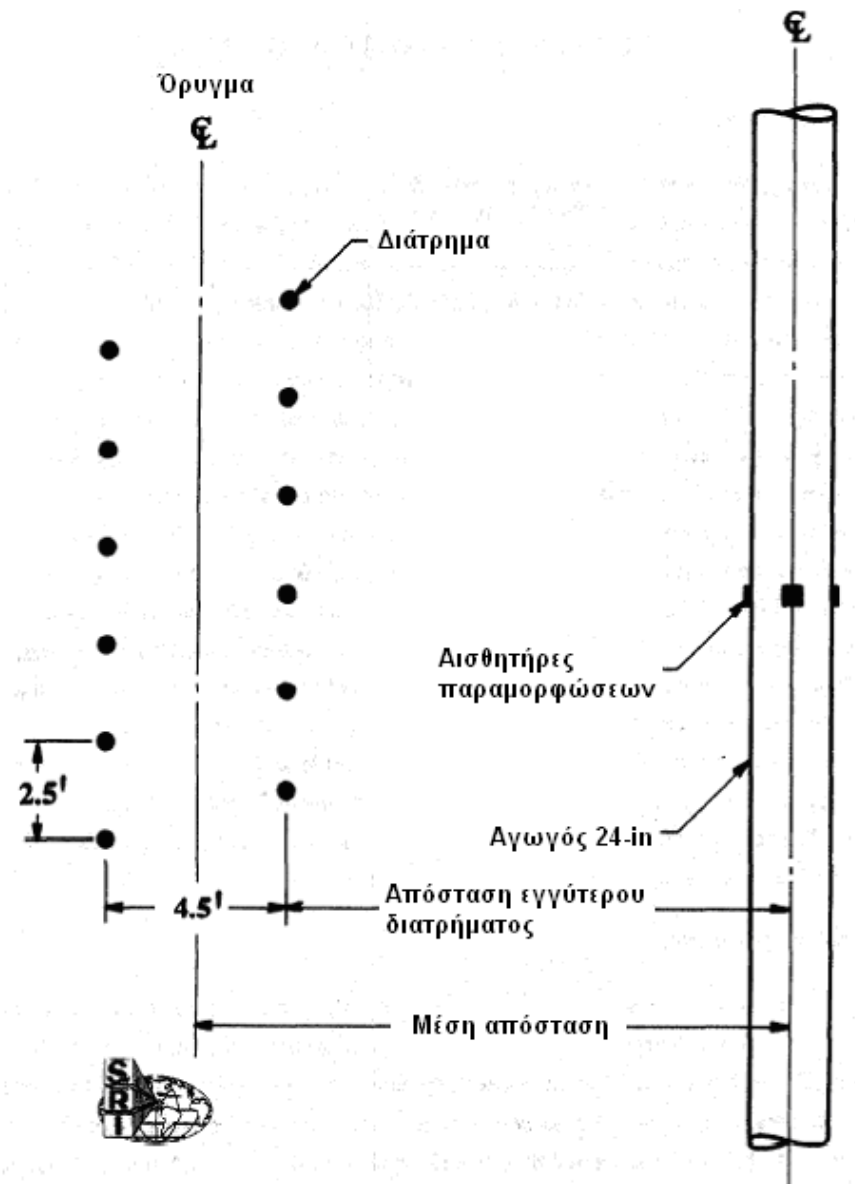
εύρος τιμών για τις αποστάσεις και για τα βάρη των γομώσεων. Έτσι, τα αποτελέσματα των πειραμάτων για το βράχο δείχνουν ότι μια απλή ρύθμιση στο συντελεστή της σχέσης (2.75), μπορεί να δώσει μια σχέση που να προσδιορίζει μεγαλύτερες τιμές τάσεων. Αυτές οι τιμές θα ισχύουν για έναν υπόγειο αγωγό με πίσω γέμισμα έδαφος, κοντά σε βραχώδεις σχηματισμούς, οι οποίοι πυροδοτήθηκαν για την εκσκαφή τάφρου. Οπότε, για την περίπτωση πυροδότησης με όρυγμα σε βράχο, η εξίσωση των τάσεων στον αγωγό από σημειακή πηγή έκρηξης είναι:

$$\frac{\sigma}{E} = 8.88 \left( \frac{uw}{\sqrt{Eu}R^{2.5}} \right)^{0.77} \quad (5.12)$$

Για να εξακριβωθεί αν η εξίσωση (5.12) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες περιπτώσεις απαιτούνται επιπλέον δεδομένα για τον έλεγχο του μετασχηματισμού. Αν γίνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων από τα πειράματα των έργων οδοποιίας και του ορύγματος προκύπτουν ότι οι τάσεις που προκύπτουν από τις δοκιμές με όρυγμα, είναι μεγαλύτερες για τις δεδομένες ανηγμένες αποστάσεις. Αυτό ισχύει ακόμα και αν οι κάναβοι με τα διατρήματα είναι της ίδιας γεωμετρίας και της ίδιας ποσότητας εκρηκτικών υλών.

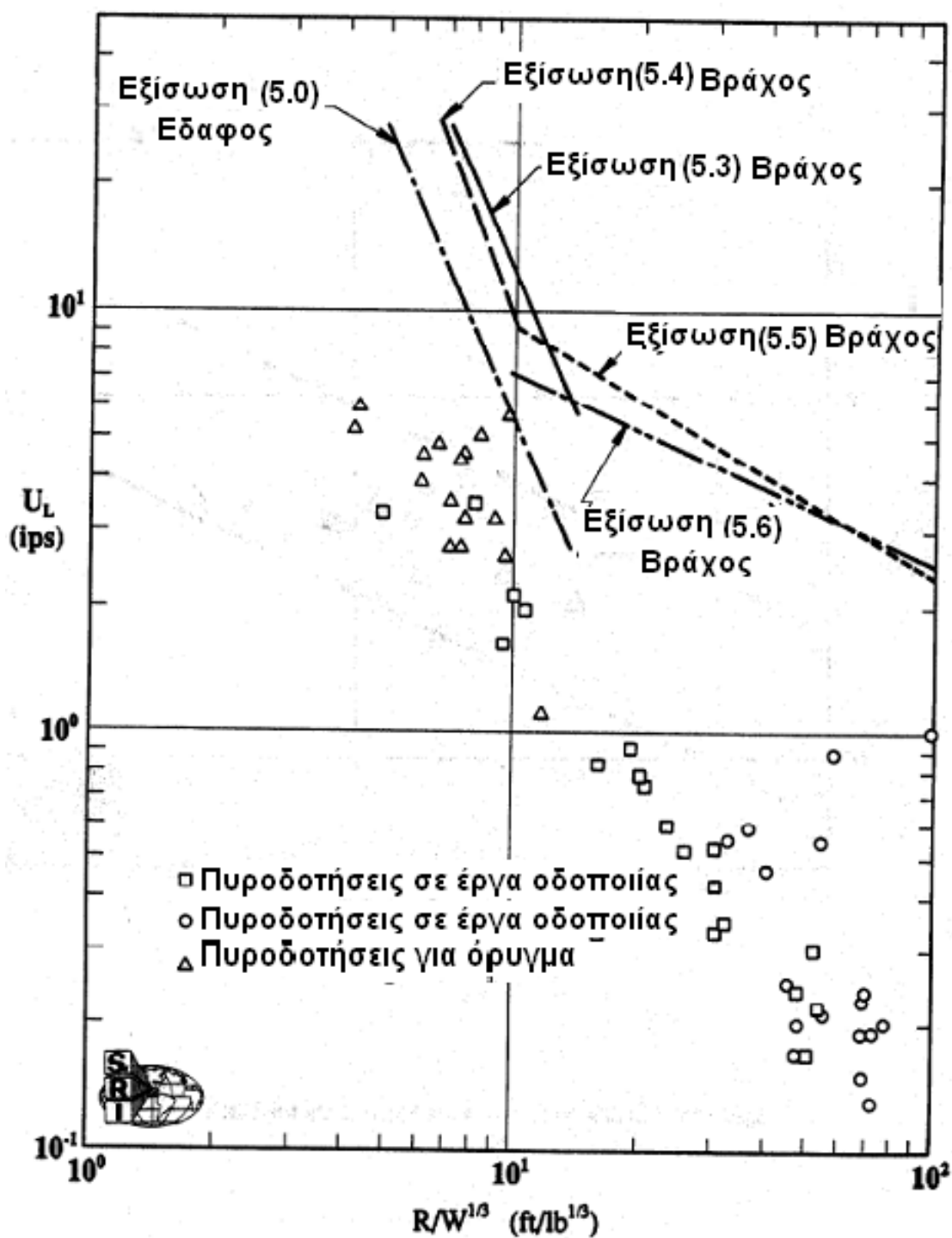
Ενώ στις πυροδοτήσεις κατά την κατασκευή των έργων οδοποιίας, το μεγαλύτερο μήκος του κανάβου ήταν παράλληλο με ανοικτές επιφάνειες των εκρηκτικών, για το όρυγμα ίσχυε το αντίθετο. Αυτή η διαφορά θεωρείται ότι ευθύνεται για την πλειοψηφία των διαφορών στις τιμές των τάσεων.

Κατά την καταγραφή των δεδομένων παρατηρήθηκε ότι είναι πολύ δύσκολο να σχεδιαστεί και να πραγματοποιηθεί στην πραγματικότητα ένα σύνολο από πειράματα, όπως συμβαίνει στο εργαστήριο. Αυτά τα προβλήματα προκαλούνται από αλλαγές στο πρόγραμμα, τις συνθήκες, το ανώμαλο σχήμα και βάθος των διατρημάτων, τη μορφολογία του εδάφους, τους νόμους για τις πυροδοτήσεις, τον επισφαλή φόρτο των εκρηκτικών, την έλλειψη συνεργασίας μεταξύ του υπευθύνου για τη δημιουργία των διατρημάτων και του πυροδοτητή, τη μη ορθότητα ή την έλλειψη μετρήσεως της απόστασης μεταξύ του αγωγού και των εκρηκτικών και τη μη συμπερίληψη στους υπολογισμούς του παράγοντα της σκόνης.

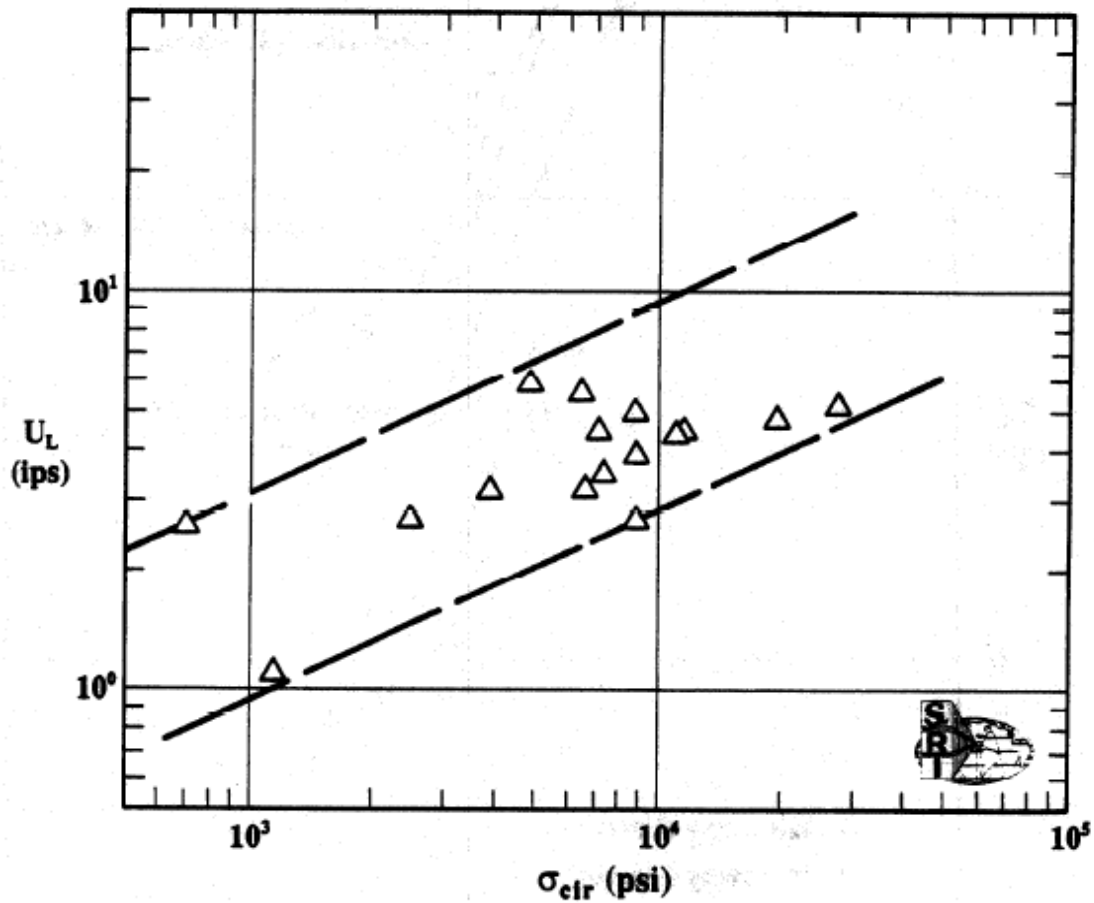


Σχήμα 5-10: Σχεδιάγραμμα της διάταξης στα πειράματα πυροδότησης με όρυγμα

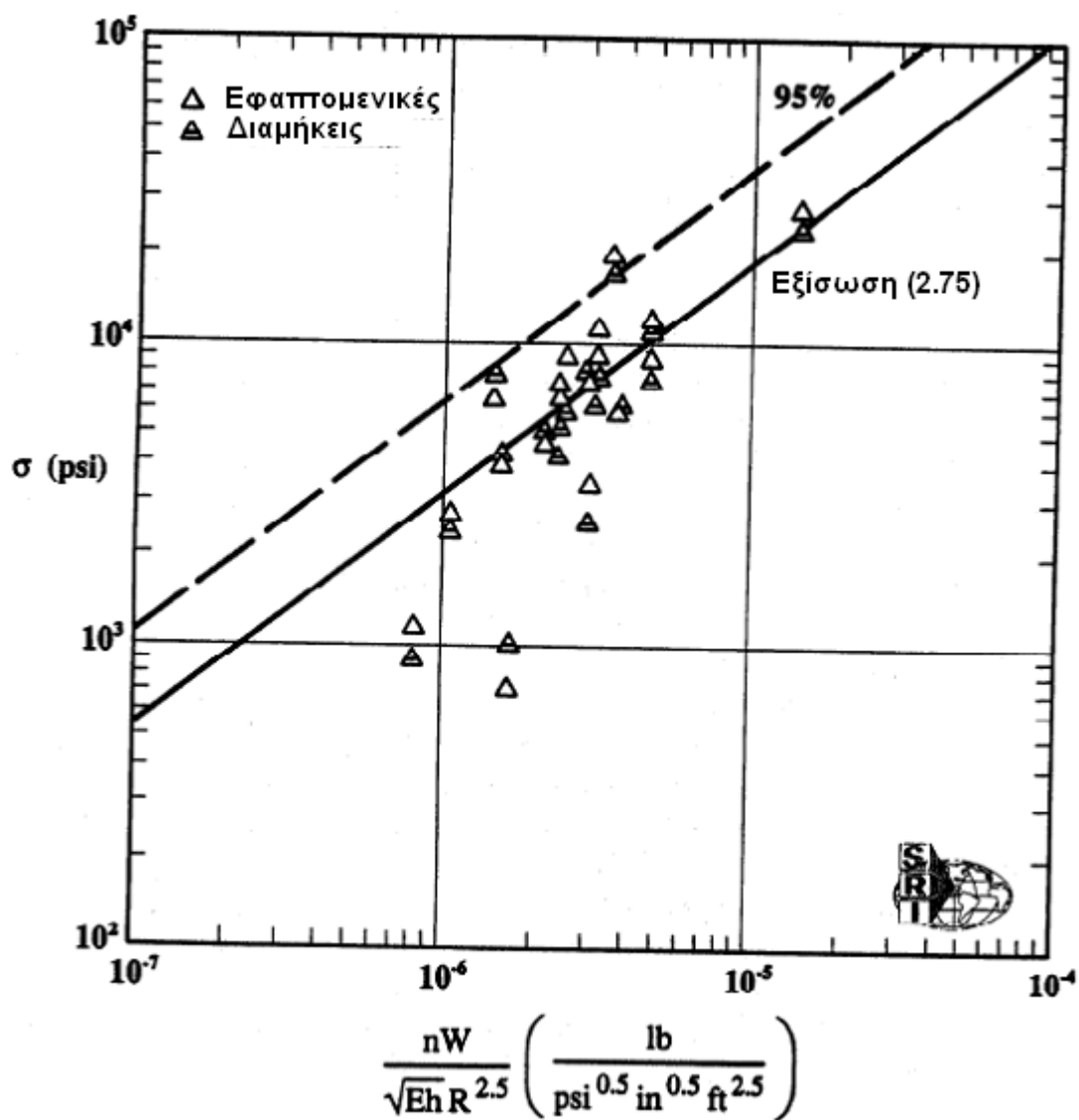




Σχήμα 5-11: Σύγκριση των ταχυτήτων από την πυροδότηση με όρυγμα με τα δεδομένα από τα πειράματα κατά την κατασκευή του αυτοκινητοδρόμου (Highway Data)



Σχήμα 5-13: Ταχύτητα των σωματιδίων συναρτήσει των τιμών της τάσης από τα πειράματα



Σχήμα 5-14: Σύγκριση μεταξύ των τάσεων σε αγωγό μεταφοράς από την πυροδότηση με όρυγμα, με τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για το έδαφος

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

# **ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΥΓΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΑΠΟ ΠΥΡΟΔΟΤΗΣΗ**

### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε όλα τα πειράματα που περιγράφηκαν παραπάνω, οι σημειακές γομώσεις που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονταν είτε στο ίδιο βάθος με τον αγωγό είτε βαθύτερα από αυτόν με την γραμμή των γομώσεων να βρίσκεται σε κλίση  $45^\circ$  από τον οριζόντιο άξονα. Στη δεύτερη περίπτωση, η απόσταση της γόμωσης από τον αγωγό ήταν 4.2 φορές μεγαλύτερη από το βάθος που ήταν τοποθετημένος. Στις εξισώσεις που προβλέφθηκαν εισάγεται παρακάτω ένας διορθωτικός συντελεστής προκειμένου να παρθεί υπόψη η επίδραση του εδάφους στα αποτελέσματα. Ο συντελεστής αυτός συντέλεσε ώστε τα θεωρητικά αποτελέσματα να είναι πολύ κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα.

Όταν ένας αγωγός είναι πολύ κοντά στην εδαφική επιφάνεια σε σχέση με την απόσταση αγωγού-γόμωσης, τότε η μάζα του εδάφους γύρω από τον αγωγό είναι αρκετά μικρότερη, με αποτέλεσμα ο αγωγός να αναπτύσσει μεγαλύτερες παραμορφώσεις, και κατ'επέκταση μεγαλύτερες τάσεις. Αυτή η αύξηση στην τάση των αγωγών θα πραγματοποιείται όταν η γόμωση είναι αρκετά βαθύτερα από τον αγωγό, ή όταν ο αγωγός βρίσκεται κοντά σε ελεύθερο έδαφος, ακόμα κι αν η γόμωση βρίσκεται στο ίδιο βάθος με το αγωγό.

Από έναν περιορισμένο αριθμό πειραμάτων υπολογίστηκε ένας διορθωτικός συντελεστής, που εισήχθη στις εξισώσεις προσδιορισμού των τάσεων που

αναπτύσσονται στον αγωγό, όταν οι τάσεις αυτές προκαλούνται από σημειακή πηγή, και ο αγωγός είναι θαμμένος σχετικά κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-1. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μάζα του εδάφους πίσω από τον αγωγό είναι αρκετά μικρή, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες τάσεις στον αγωγό από αυτές που προβλέπονται από τις εξισώσεις για σημειακή πηγή. Για την απαλοιφή της διαφοράς που υπάρχει μεταξύ εκτίμησης και μέτρησης, η λύση για την σημειακή πηγή τροποποιείται με την εισαγωγή της ακόλουθης έκφρασης του διορθωτικού συντελεστή  $F$  :

$$F = \left[ \frac{H}{R} + \frac{\rho_p h}{\rho_s R} \right], \quad (6.1)$$

όπου

$H$  = είναι το πάχος του εδάφους μεταξύ του αγωγού και της ελεύθερης επιφάνειας, που επιδρά στο αποτέλεσμα της τάσης σε  $ft$ .

$R$  = είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων του αγωγού και της πηγής έκρηξης σε  $ft$ ,

$h$  = είναι το πάχος του τοιχώματος του αγωγού σε  $ft$ ,

$\rho_s$  = είναι πυκνότητα της μάζας του εδάφους σε  $(lb - sec^2 / ft^4)$ , και

$\rho_p$  = είναι η πυκνότητα του υλικού του αγωγού  $(lb - sec^2 / ft^4)$ .

Η εξίσωση (6.1), είναι αδιάστατη. Για τον υπολογισμό της αριθμητικής τιμής του  $F$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε σύνολο μονάδων που βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους.

Από ένα περιορισμένο αριθμό πειραματικών δεδομένων, διαπιστώθηκε ότι, ο διορθωτικός συντελεστής που ορίζεται από την εξίσωση (6.1), πρέπει να χρησιμοποιείται όταν ο λόγος  $(R/H)$  είναι μεγαλύτερος από 4. Άρα, για τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται διατρήματα μεγάλου βάθους, ή όπου ο αγωγός είναι σχετικά κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια, η λύση για την σημειακή πηγή πρέπει να τροποποιηθεί με τον διορθωτικό συντελεστή  $F$ , ως ακολούθως:

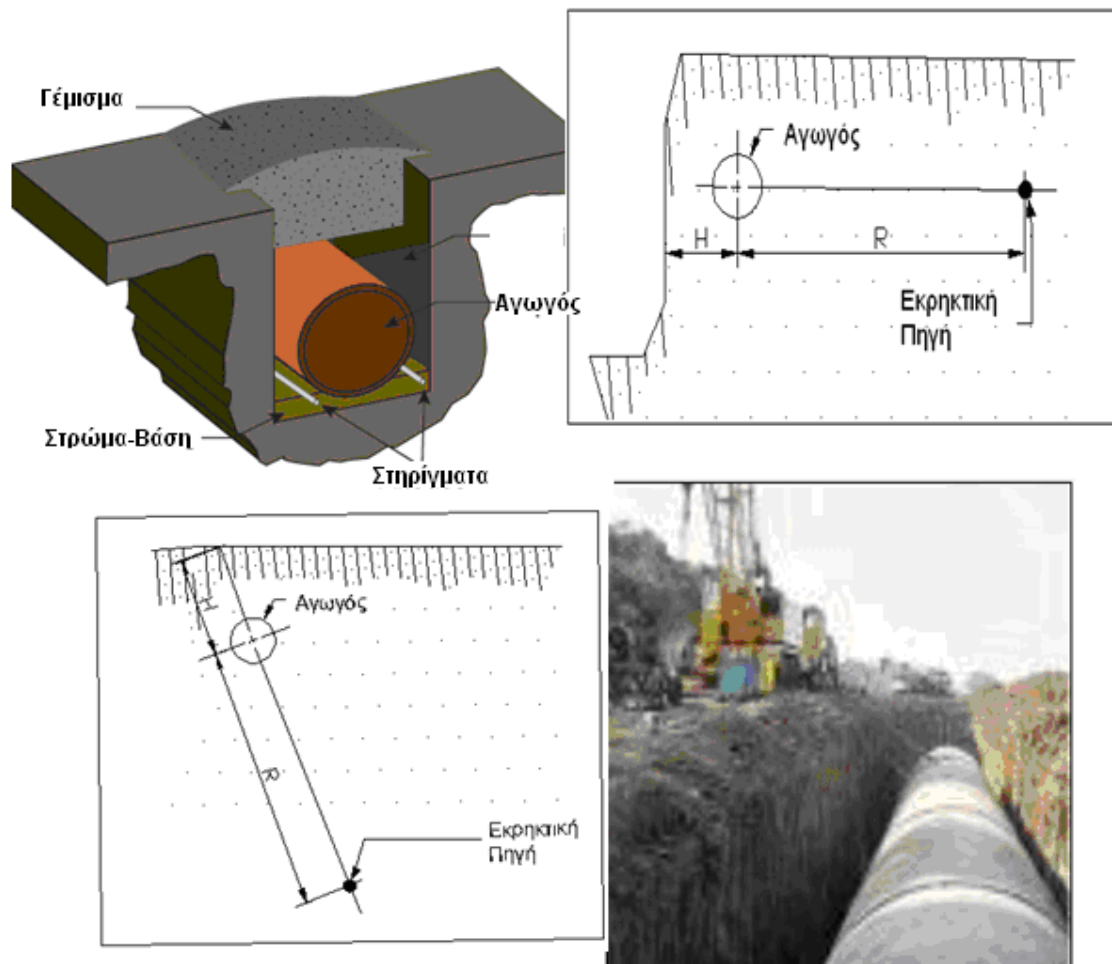
$$\frac{\sigma}{E} = 4.44 \left( \frac{nW}{\sqrt{EhFR^{2.5}}} \right)^{0.77}, \quad (6.2)$$

όπου

$F = 1$ , όταν  $R/H \leq 4$ , και

$F =$  εξίσωση (6.1), όταν  $R/H > 4$ .

Σημειώνεται ότι η εξίσωση αυτή αναπτύχθηκε εμπειρικά από λίγα μόνο στοιχεία, και η μεγαλύτερη τάση που μετρήθηκε ήταν μόνο 3452 psi. Παρόλα αυτά, με την χρήση της εξίσωσης (6.1) για μεγαλύτερες τιμές τάσης, προκύπτουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις.



Σχήμα 6-1: Παραδείγματα αγωγού που βρίσκεται κοντά σε ελεύθερη επιφάνεια

## **6.2 Η ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ**

Από την θεωρητική μελέτη της επίδρασης ενός ανοικτού ορύγματος σε αγωγό μεταφοράς και σε μια εκρηκτική πηγή, προέκυψε ότι, όταν δίνονται οι κατάλληλες συνθήκες, το όρυγμα μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις επιδράσεις της έκρηξης στον αγωγό. Για μικρές συχνότητες ταλάντωσης με αντίστοιχα μεγάλα μήκη κύματος, για να είναι αποτελεσματικό το όρυγμα, θα πρέπει να είναι πολύ βαθύ. Οι πυροδοτήσεις υπεδάφρων εκρηκτικών υλών, παρόλο που δεν είναι πηγές ταλάντωσης, συνήθως παράγουν σεισμικά κύματα που είναι σχετικά μεγάλα. Έτσι, προκύπτει ότι για την θωράκιση τμήματος αγωγού από πυροδότηση υπεδάφρων εκρηκτικών υλών, χρειάζονται ορύγματα με πολύ μεγάλο βάθος.

Εντούτοις, πειραματικά δεδομένα από ένα μικρό δείγμα δοκιμών πυροδότησης μικρής ποσότητας εκρηκτικών υλών, έδειξαν ότι υπάρχει σημαντική μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό μεταφοράς κάτω από ορισμένες συνθήκες, με ορύγματα. Παρακάτω, αναπτύσσεται μια συνάρτηση, που συσχετίζει την μείωση της τάσης στον αγωγό με την ύπαρξη ορύγματος. Αυτή η συνάρτηση συσχετίζει την μείωση της τάσης με την απόσταση μεταξύ του αγωγού και της πηγής, το βάθος του ορύγματος, το μέγεθος της τάσης χωρίς την επίδραση του ορύγματος, τη θέση του αγωγού πίσω από το όρυγμα, και το μήκος του ορύγματος.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι ο λόγος της μείωσης της τάσης, ήταν μια συνάρτηση πρωτίστως της απόστασης μεταξύ του αγωγού μεταφοράς και της πηγής έκρηξης και ότι οι άλλοι όροι είχαν δευτερεύουσα σημασία. Στον λόγο της μείωσης της τάσης εφάρμοσε μια εξίσωση με γραφική παράσταση καμπύλη. Στην απόσταση μεταξύ του αγωγού και της πηγής όμως όχι.

Στα Σχήματα 6-3 και 6-4, παρουσιάζονται τα περιγράμματα της μείωσης της μετατόπισης κατά τον κατακόρυφο άξονα (Woods (1968)) στα οποία φαίνεται η μείωση του εύρους της μετατόπισης όταν παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο με το εύρος χωρίς εμπόδιο. Επίσης, στο Σχήμα 6-3, φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος στο οποίο παρεμβιλλόταν ένα ενεργό όρυγμα, δηλαδή ένα εμπόδιο πολύ κοντά στην

πηγή, με τόξο γωνίας 180 μοιρών σε ανηγμένη απόσταση ( $Rt/LR = 0.596$ ), με μήκη κύματος Rayleigh από την πηγή, και με ένα ανηγμένο βάθος ( $Dt/LR = 0.596$ ) μηκών κύματος Rayleigh. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η μέγιστη μείωση στο εύρος είναι ένας παράγοντας περίπου  $1/8$ . Σημειώνεται ότι, σε άλλες θέσεις, τα εύρη αυξάνονται λόγω των αντανakλάσεων και της εστίασης. Σε αυτό το σχήμα, το  $Dt$  είναι το βάθος του ορύγματος, το  $LR$  είναι το μήκος κύματος του κύματος Rayleigh, εξίσωση (6.4), και το  $P$  είναι η απόσταση μεταξύ του ορύγματος και της πηγής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-3, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για ένα παρόμοιο ενεργό όρυγμα με τις ίδιες τιμές για ( $Dt/LR$ ) και ( $Rt/LR$ ).

Στο Σχήμα 6-4, φαίνεται το περίγραμμα της μείωσης της κατακόρυφης εδαφικής ταλάντωσης για ένα παθητικό όρυγμα, δηλαδή εμπόδια κοντά στο έδαφος που θωρακίζεται, που είχε ανηγμένο βάθος ( $Dt/LR = 1.19$ ), ανηγμένο μήκος ( $Lt/LR = 1.79$ ), και η ανηγμένη απόσταση μεταξύ της πηγής και του ορύγματος ήταν ( $Rt/LR = 2.97$ ). Επίσης, στο σχήμα αυτό δείχνεται ότι ένα όρυγμα, μπορεί να μειώσει το μέγιστο εύρος, σε ένα εύρος με τιμές στο  $1/8$  του αρχικού εύρους χωρίς το όρυγμα. Ο Barkan (1962), είχε συνοψίσει ότι είναι αδύνατο να κατασκευαστεί ένα όρυγμα σε τέτοιο βάθος που να μπορεί να σταματάει τα κύματα χαμηλών συχνοτήτων, που έχουν μεγάλα μήκη κύματος.

Οι περισσότερες από τις μελέτες ταλάντωσης έγιναν για να μειωθούν οι επιδράσεις των χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεων (μικρότερες των 10 Hz), που αντιστοιχούν σε μεγάλα μήκη κύματος. Δυστυχώς, οι εκρηκτικές πηγές εκπέμπουν συνήθως σε πολύ μεγάλα μήκη κύματος, και επομένως, οι συχνότητες που συνδέονται με αυτά είναι πολύ χαμηλές.

Τα Σχήματα 6-3 και 6-4 του Woods (1968), είναι για βάθη ορυγμάτων των 0.596 μηκών Rayleigh- κύματος. Για να προκύψει μείωση του εύρους, παρόμοια με εκείνη στα δύο σχήματα, απαιτείται ένα όρυγμα βάθους 16m. Ακόμα, οι μεγαλύτερες απελευθερώσεις εκρηκτικής ενέργειας θα παράγουν κύματα μεγαλύτερου μήκους, σε σύγκριση με εκείνα που αντιστοιχούν σε χαμηλότερες συχνότητες.

Εκτός, από τη χρησιμοποίηση της μεθόδου που εισήχθη από τον Barkan, μπορούν να υιοθετηθούν δύο άλλες, πιο σύνθετες μέθοδοι από μαθηματικής άποψης. Η πρώτη



είναι αυτή που πρόκειται να χρησιμοποιήσει την κλασσική ελαστικότητα. Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν αριθμητικές υπολογιστικές λύσεις. Αν για παράδειγμα, κάποιος προβλέψει την μέγιστη εδαφική μετατόπιση πίσω από ένα κατακόρυφο όρυγμα για ένα ασθενές κύμα, δηλαδή ένα κύμα που διαδίδεται με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του ήχου στο έδαφος, η λύση θα περιλαμβάνει τουλάχιστον τις παρακάτω παραμέτρους:

$$\left(\frac{X_t}{X}\right) = f\left(\frac{D_t}{L_R}, \frac{X}{L_R}, \frac{Y}{L_R}, \frac{Z}{L_R}, \frac{L_t}{L_R}\right), \quad (7.3)$$

όπου

$X_t$  = είναι η εδαφική μετατόπιση, όταν παρεμβάλλεται όρυγμα,

$X$  = είναι οι εδαφικές μετατοπίσεις, που προβλέφθηκαν χωρίς την παρεμβολή ορύγματος,

$L_R$  = είναι το μήκος κύματος του R-wave,

$D_t$  = είναι το βάθος του ορύγματος,

$Y$  = είναι η τετμημένη για την τοποθέτηση του σημείου μέτρησης πίσω από το όρυγμα,

$Z$  = είναι η τεταγμένη για την τοποθέτηση του σημείου μέτρησης πίσω από το όρυγμα, και

$L_t$  = είναι το μήκος του ορύγματος.

Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα αποτελέσματα των πειραμάτων, το μήκος του Rayleigh κύματος για κάθε πείραμα εκτιμήθηκε από την παρακάτω σχέση.

$$L \approx \pi \frac{cX}{U}, \quad (6.4)$$

όπου

$c$  = είναι η ταχύτητα του σεισμικού κύματος (θεωρείται μια τιμή των 950 ft/sec (290 m/sec),

$X$  = είναι η ακτινική μετατόπιση του εδάφους σε ft, και

$U$  = είναι η ταχύτητα του σωματιδίου του εδάφους σε ft/sec.

Οι κινήσεις του εδάφους υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.10) και (2.11) υποθέτοντας πως  $\rho = 102 \frac{lb}{ft^3}$ . Από την στιγμή που η παραμόρφωση εξαρτάται από την εδαφική μετατόπιση, η εξίσωση (6.3) μπορεί να εκφραστεί ως λόγος των παραμορφώσεων, ως εξής :

$$\left( \frac{\varepsilon_{meas}}{\varepsilon_{ca}} \right)_l = f \left( \frac{R}{L_R}, \frac{D}{L_R}, \varepsilon_{cal}, \frac{Y}{L_R}, \frac{Z}{L_R}, \frac{L_t}{L_R} \right). \quad (6.5)$$

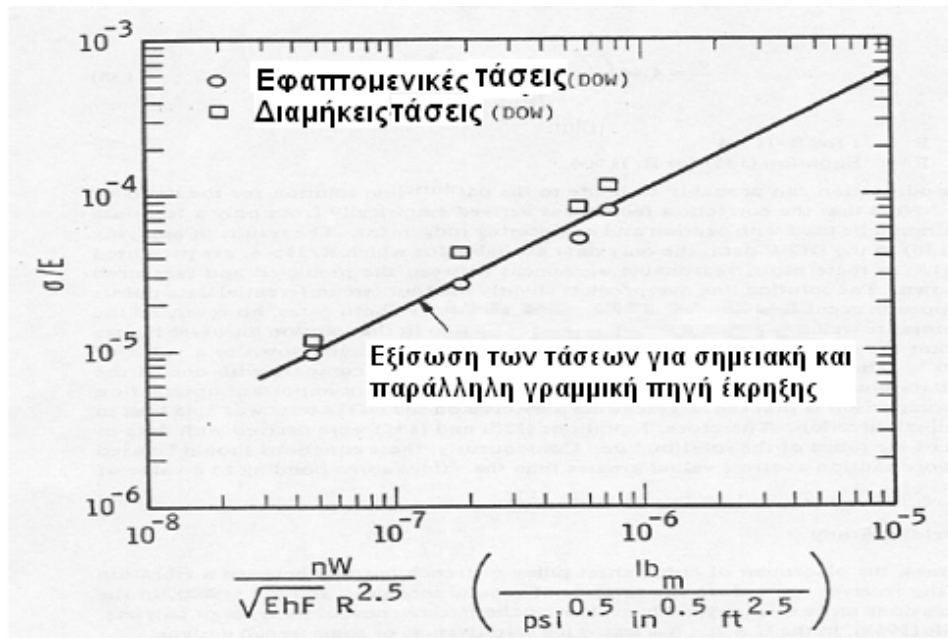
Η εξίσωση για την καμπύλη 6-5, ορίζεται από την σχέση:

$$\frac{\varepsilon_{meas}}{\varepsilon_{cal}} = 0.068 e^{3.24 R/L_R}, \quad (6.6)$$

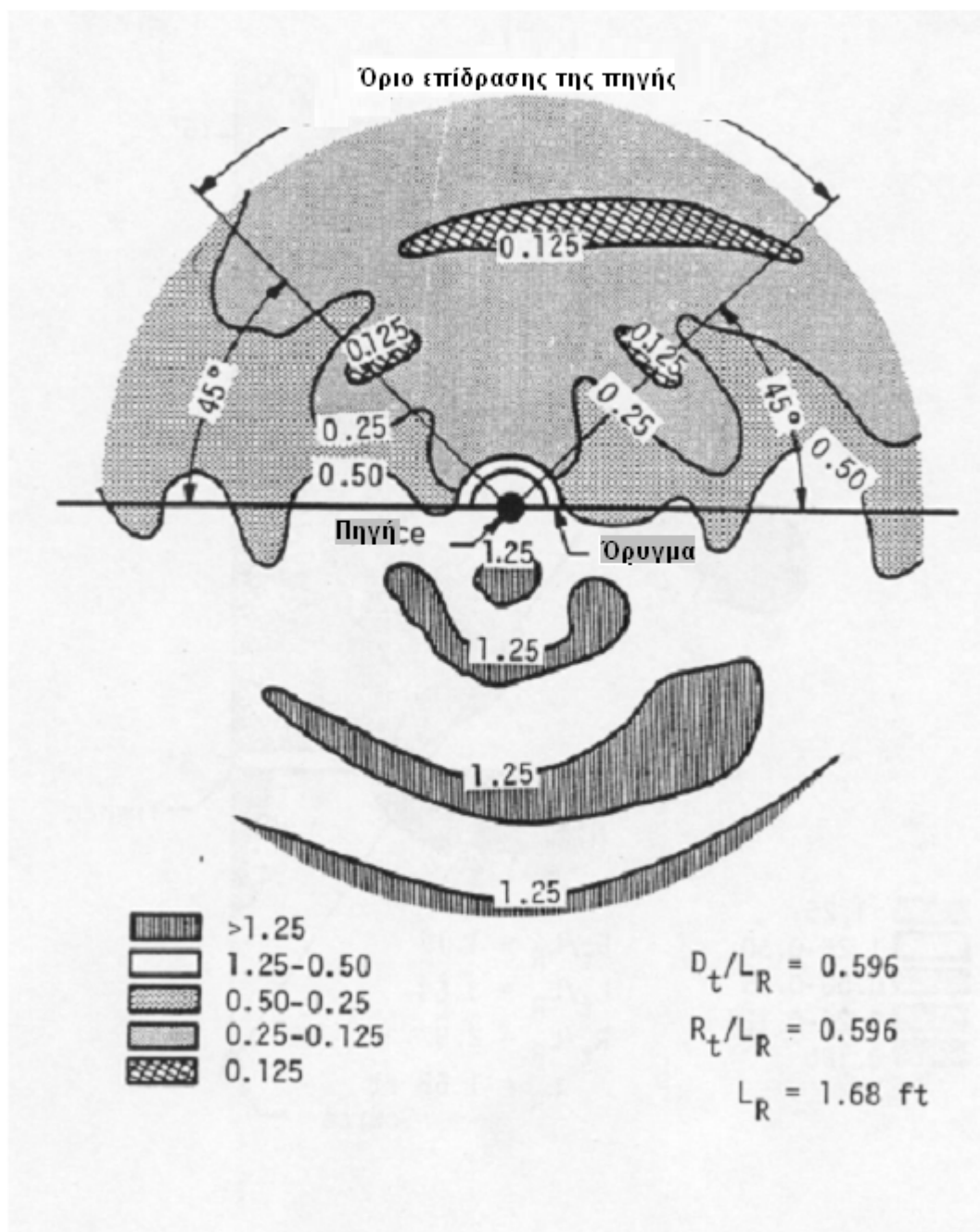
όπου

$$0.25 < \frac{R}{L_R} < 0.83.$$

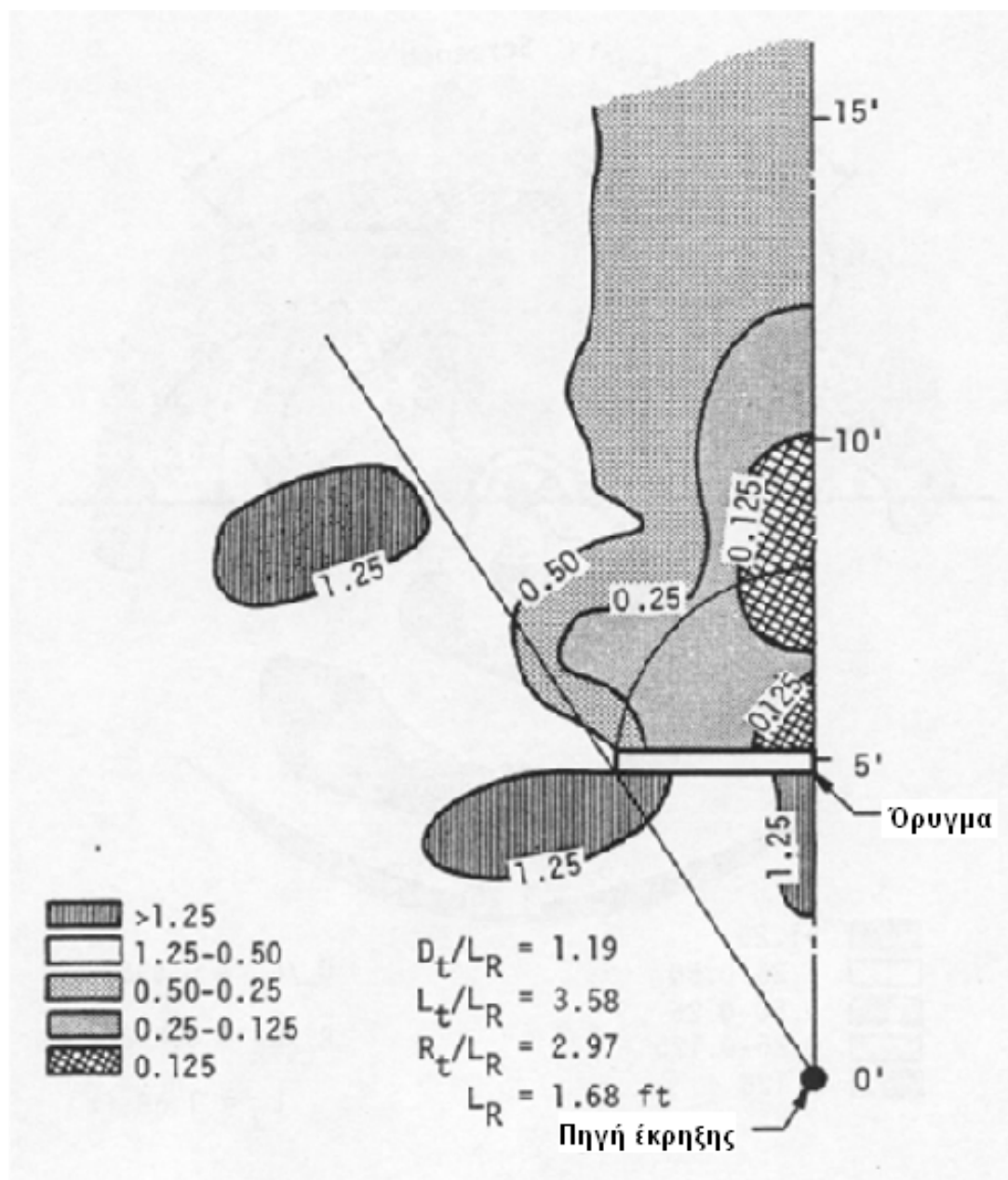
Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιώντας όλους του περιορισμούς που τέθηκαν για τους λόγους  $R/L_R$ ,  $D/L_R$ ,  $Y/L_R$ ,  $Z/L_R$ , και  $L_t/L_R$ .



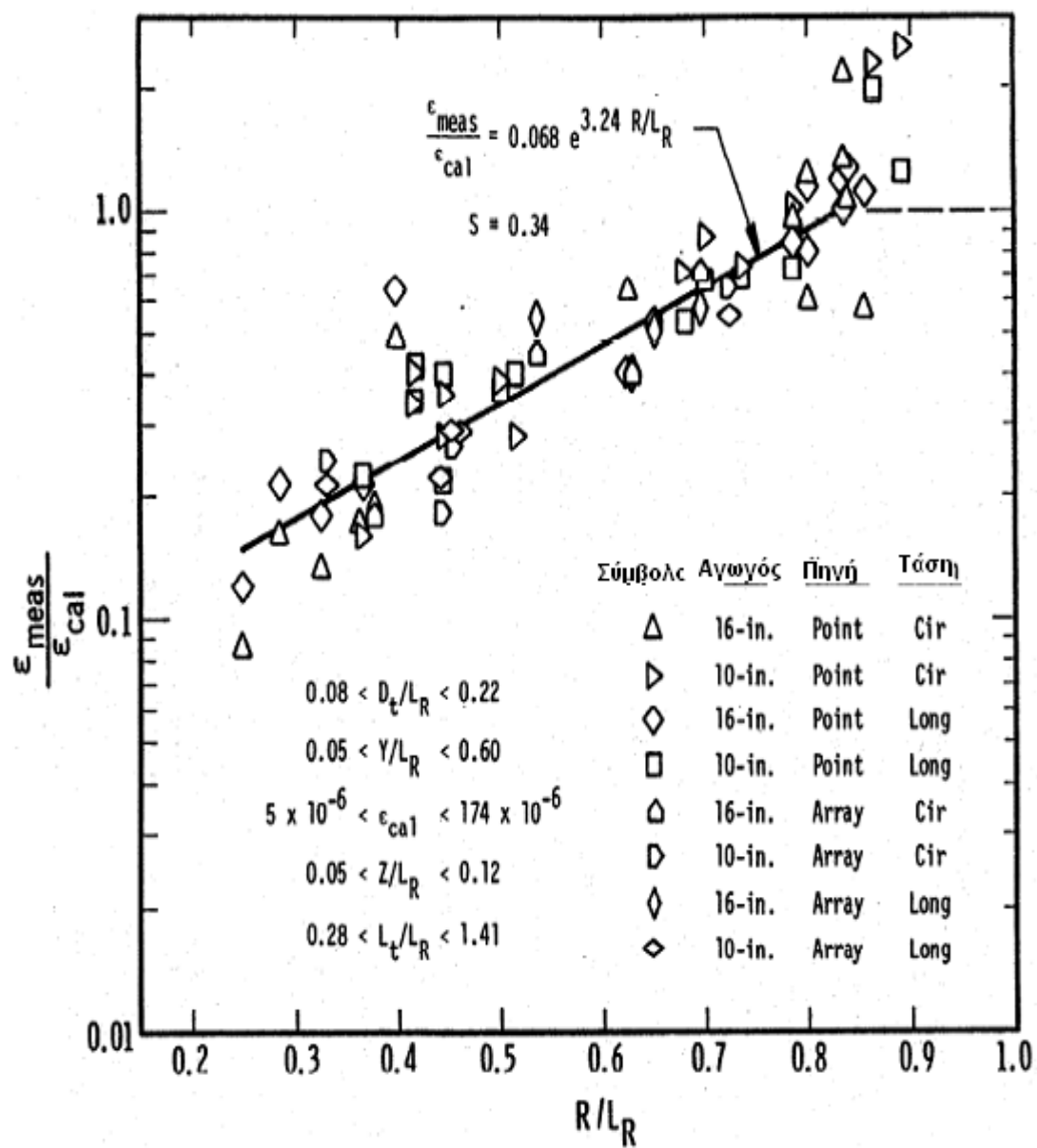
**Σχήμα 6-2:** Σύγκριση μεταξύ δεδομένων από πειράματα στα οποία η σημειακή πηγή ήταν σε μεγάλο βάθος, και της καμπύλης της εξίσωσης της τάσης για πηγή με μορφή σημείου και την πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό



Σχήμα 6-3: Περίγραμμα του εύρους της μείωσης της απελευθερούμενης ενέργειας της έκρηξης, λόγω παρεμβολής ενεργού ορύγματος- Woods (1968)



Σχήμα 6-4 : Περίγραμμα του εύρους της μείωσης της απελευθερούμενης ενέργειας της έκρηξης, λόγω παρεμβολής παθητικού ορύγματος- Woods (1968)



Σχήμα 6-5: Εκτίμηση της μείωσης της τάσης στον αγωγό εξαιτίας της ύπαρξης ορύγματος

### 6.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΔΥΟ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δείχνουν την απόκριση του αγωγού και τις μετακινήσεις των μορίων του εδάφους που προκαλούνται από υπόγειες εκρηκτικές. Οι ανατινάξεις χρησιμοποιούνται συχνά για την εκσκαφή ή την κατάτμηση βραχωδών μαζών που βρίσκονται κοντά σε αγωγούς που είναι θαμμένοι στο έδαφος. Γι' αυτό από την ομάδα του Esparza, διεξήχθη μια μικρή έρευνα χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο σύνολο διατεταγμένων εδαφικών μοντέλων από πειράματα. Σκοπός ήταν να παρατηρηθεί τι συμβαίνει όταν η γόμωση που πυροδοτείται είναι μέσα σε ένα σκληρό υλικό έδαφος και τα σεισμικά κύματα που δημιουργούνται φορτίζουν τον αγωγό, ο οποίος βρίσκεται σε ένα μαλακό υλικό.

Στο Σχήμα 6-6, φαίνεται μια πλάκα από σκυρόδεμα των 41 Mpa, που έχει διαστάσεις 10X10X3 ft, που τοποθετήθηκε δίπλα στον αγωγό. Προγραμματίστηκαν και πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές. Στις δοκιμές από αριθ. 25 μέχρι 27 πυροδοτήθηκαν οι γομώσεις που είχαν τοποθετηθεί στις τρύπες της πλάκας (αυτές οι τρύπες σχεδιάστηκαν σκόπιμα για τις γομώσεις). Η τρύπα για τις γομώσεις της δοκιμής αριθ. 28 έγινε με τρυπάνι, αφού είχαν ολοκληρωθεί τα παραπάνω τρία πειράματα. Και για τις τέσσερις δοκιμές, για το φορμάρισμα των τρυπών, χρησιμοποιήθηκε πλαστική γόμωση τύπου C-4, που περιβλήθηκε με χώμα και το κενό μέχρι την επιφάνεια καλύφθηκε με αμμοχάλικο. Για να μην γίνει διαρροή της έκρηξης, τοποθετήθηκε πάνω από την τρύπα των γομώσεων ένα πιάτο χάλυβα και τρία κομμάτια σκυροδέματος με διαστάσεις 2X2X4 ft σε σχήμα πυραμίδας για να το κρατούν με το βάρος τους.

Από τις τέσσερις αυτές δοκιμές με υλικά σκυρόδεμα και έδαφος, από τις κινήσεις του εδάφους και τα δεδομένα για τις τάσεις που αναπτύσσονται σε αγωγό μεταφοράς, αναπτύχθηκε μια προσεγγιστική εξίσωση για τον υπολογισμό της ισοδύναμης απόστασης μεταξύ του αγωγού και της πηγής για το έδαφος. Αυτή η ισοδύναμη απόσταση επιτρέπει, οι εξισώσεις που προβλέφθηκαν για την πηγή με μορφή σημειακής γόμωσης, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των τάσεων στον αγωγό και στην περίπτωση της ανατίναξης με δυο υλικά εδάφους.

Η εξίσωση που προέκυψε για την εκτίμηση της απόστασης μεταξύ του αγωγού και της πηγής για τα πειράματα με έδαφος σκυροδέματος/εδάφους είναι :

$$\frac{R_{eff}}{R} = 0.746 \left( \frac{W_e}{\rho_s c_s^2 R_c^3} \right)^{0.028} \left( \frac{\rho_s c_s^2}{\rho_c c_c^2} \right)^{0.014}, \quad (6.7)$$

όπου

$R_{eff}$  = είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού και της πηγής έκρηξης μέσα στο έδαφος σε  $ft$ , (είναι η απόσταση που μπαίνει στον τύπο της παραμόρφωσης)

$R$  = είναι η απόσταση πηγής-αγωγού σε  $ft$ ,

$W_e$  = είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται από την έκρηξη σε  $ft \times lb$ ,

$\rho_s$  = είναι η πυκνότητα της μάζας του εδάφους σε  $lb \times sec^2 / ft^4$ ,

$c_s$  = είναι η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων στο έδαφος σε  $ft/sec$ ,

$R_c$  = είναι το τμήμα της  $R$  που βρίσκεται μέσα σε σκυρόδεμα σε  $ft$ ,

$\rho_c$  = είναι η πυκνότητα της μάζας του σκυροδέματος σε  $lb \times sec^2 / ft^4$ , και

$c_c$  = είναι η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων μέσα στο σκυρόδεμα σε  $ft/sec$ .

Η ενέργεια  $W_e$  σε μια εκρηκτική γόμωση υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό της συγκεκριμένης ενεργειακής απελευθέρωσης της εκρηκτικής ύλης με το βάρος της γόμωσης. Για αυτές τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε η πλαστική εκρηκτική ύλη C-4 που έχει ενεργειακή απελευθέρωσή  $1.05 \times 10^6$  (  $N \cdot m / Kg$  ). Οι τιμές για το ειδικό βάρος και την ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων του σκυροδέματος μετρήθηκαν στα τιμεντένια μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν. Οι τιμές που χρησιμοποίησαν στην εγκατάσταση των στοιχείων ήταν  $\rho_c = 2445 N \times sec^2 / m^4$  και  $c_c = 3962 m/sec$ . Το ειδικό βάρος του εδάφους ήταν  $\rho_s = 1634 N \times sec^2 / m^4$ .

Η εξίσωση (6.7) δείχνει ότι, πειράματα με μοντέλα ανηγμένων τιμών, μπορούν να δημιουργήσουν χρήσιμα δεδομένα. Αυτά μπορούν να διαμορφώσουν την μέθοδο, η οποία προβλέπει τις τάσεις που ασκούνται στον αγωγό, όταν γίνεται έκρηξη σε έδαφος δυο υλικών. Επειδή, δεν υπάρχουν παρόμοια πειράματα που να χρησιμοποιείται βράχος αντί για σκυρόδεμα, δεν μπορεί να καθορισθεί αν αυτή η εξίσωση μπορεί άμεσα να εφαρμοσθεί σε περίπτωση έκρηξης με βράχο/έδαφος.

Εντούτοις, για περιπτώσεις βράχος/έδαφος με παρόμοια γεωμετρία με αυτήν της μελέτης, η εξίσωση (6.7) θα πρέπει να παρέχει απλές εκτιμήσεις της απόστασης μεταξύ του αγωγού και της πηγής. Σε αυτήν την περίπτωση, αντί για τις αντίστοιχες τιμές του σκυροδέματος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν η τιμή της πυκνότητα της μάζας του βράχου και της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων μέσα σε αυτόν. Εξαιτίας των πολλών παραμέτρων στα προβλήματα με δύο μέσα, για να αναπτυχθούν λύσεις τόσο γενικές όσο και στην περίπτωση του ενός μέσου, είναι σημαντική η χρήση περισσότερων δεδομένων. Για τις άλλες γεωμετρίες εκρηκτικών σε έδαφος βράχος/έδαφος, απαιτούνται δοκιμές στον πραγματικό χώρο των πειραμάτων, ώστε τα αποτελέσματα για σκυρόδεμα/έδαφος να διατεθούν σε μια πιο σταθερή βάση.

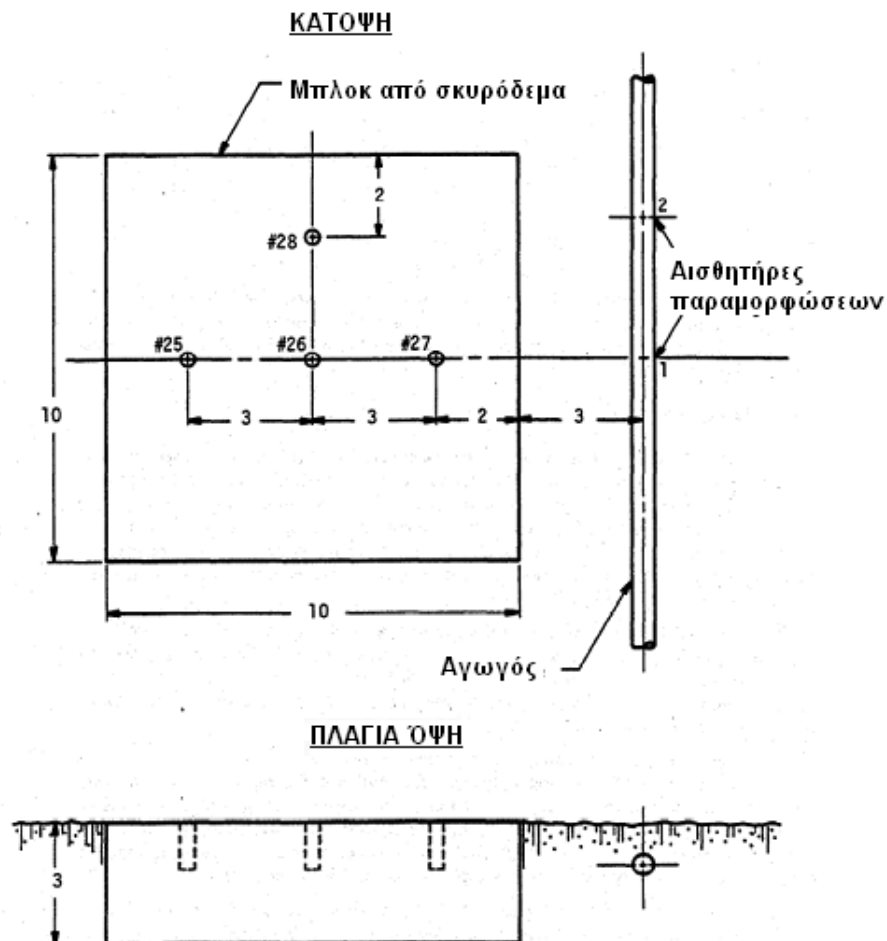
Σημειώνεται ότι στην εξίσωση (6.7), και οι δύο εκθέτες είναι αρκετά μικροί με αποτέλεσμα οι  $(Reff/R)$  να είναι αδύναμες συναρτήσεις των αδιάστατων ομάδων στις παρενθέσεις. Μια μέση τιμή  $\frac{W_e}{\rho_s c_s^2 R_c^3}$  για σε αυτές τις δοκιμές ήταν περίπου 0.016 .

Από την εξίσωση (6.7), υπολογίζονται οι τιμές της  $Reff$  που αντιστοιχούν στις παραμορφώσεις του αγωγού που μετρήθηκαν. Στο Σχήμα 6-7, η καμπύλη της λύσης για την σημειακή γόμωση και την πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής ως προς τον αγωγό συγκρίνεται με τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την τάση για σκυρόδεμα/έδαφος. Επίσης, φαίνεται ότι το εύρος των τάσεων που μετρήθηκαν είναι αρκετά μικρό. Παρόμοια, η Εξίσωση (6.7), χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστούν οι τιμές της  $Reff$  για οποιοδήποτε μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Έτσι, στο Σχήμα 6-8, τα δεδομένα για τις εδαφικές μετατοπίσεις από το σκυρόδεμα/έδαφος συγκρίνονται με τις καμπύλες για την σημειακή γόμωση. Αυτή η σύγκριση αποτελεί επιπλέον στοιχείο ότι η υπολογισμένη  $Reff$  για κάθε περίπτωση με δύο υλικά παράγει σωστές εκτιμήσεις όταν οι συνθήκες είναι παρόμοιες με αυτές της διεξαγωγής των πειραμάτων. Επίσης, το εύρος των δεδομένων για τις εδαφικές μετακινήσεις είναι μεγαλύτερο από αυτό για τα δεδομένα των τάσεων. Συνεπώς, η ακριβής χρήση της εξίσωσης (6.7) πρέπει να περιορίζεται μόνο στις περιπτώσεις που είναι παρόμοιες με αυτές της παρούσας μελέτης. Για άλλους σχηματισμούς, πρώτα πρέπει να μελετηθούν κάποια δεδομένα από τα πειράματα για να αποφασιστεί αν μπορεί να γίνει χρήση της εξίσωσης (6.7). Μια τελευταία παρατήρηση για την παραπάνω εξίσωση είναι, ότι μέσα στο εύρος των πειραματικών δεδομένων, το σίγουρο σφάλμα για την  $Reff$  ήταν μόλις 0.19. Παρόλα

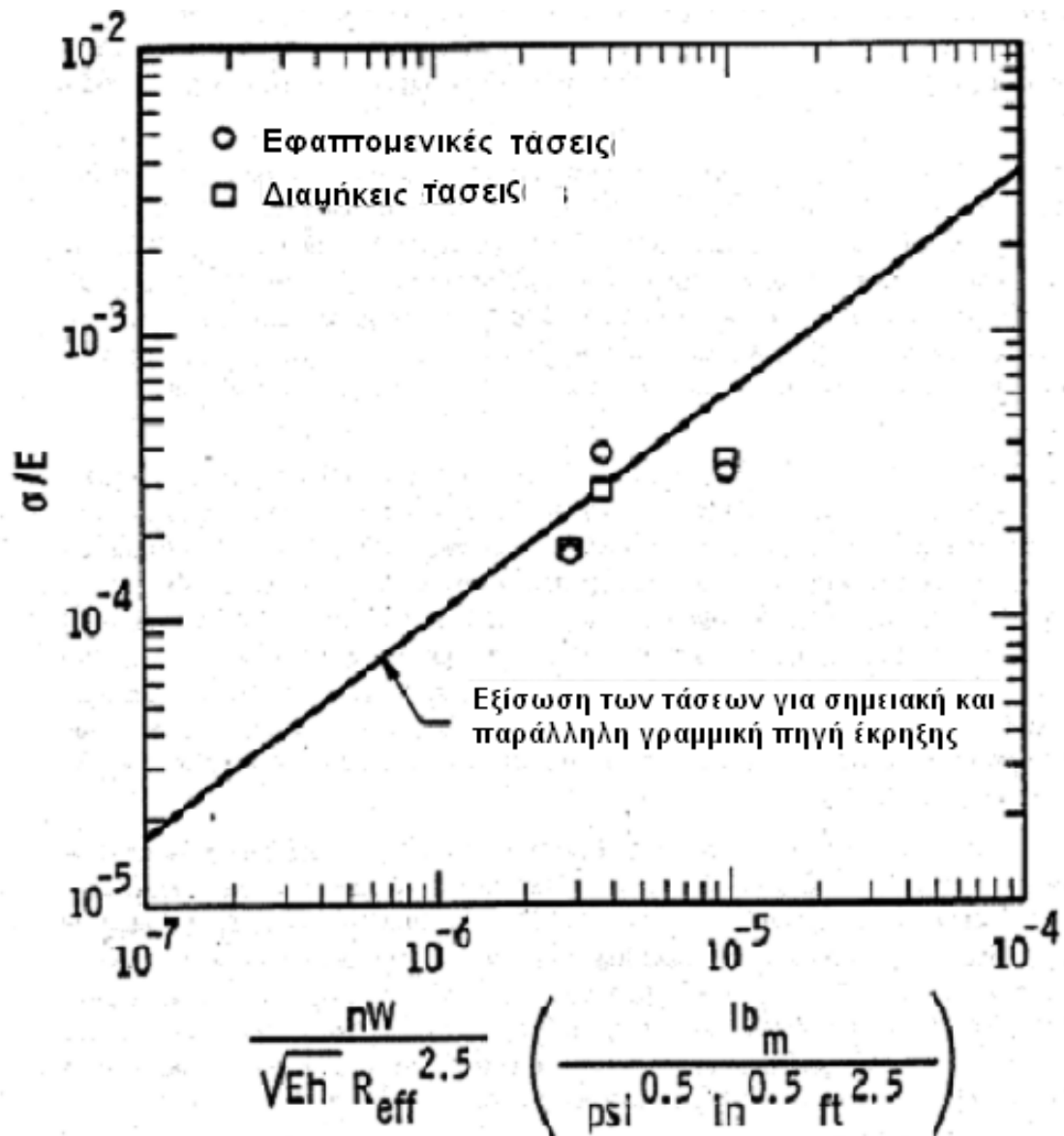


αυτά, επειδή η  $R_{eff}$  χρησιμοποιείται στις εξισώσεις για την σημειακή γόμωση, για την πρόβλεψη των τάσεων στον αγωγό ή των εδαφικών μετατοπίσεων, το κάθε σφάλμα στην  $R_{eff}$  αυξάνεται σημαντικά.

Θεωρητικά, πριν αυτή η εξίσωση θεωρηθεί ως γενική λύση, όπως έγινε και στο ένα μέσο διάδοσης, εξαιτίας της μεγαλύτερης διασποράς των παραμέτρων, χρειάζονται για σκυρόδεμα/έδαφος δεν μπορεί ακόμα να εκτιμηθεί αν η εξίσωση (6.7), μπορεί να εφαρμοστεί για περιπτώσεις έκρηξης σε βράχο/έδαφος. Παρόλα αυτά, για άλλες περιπτώσεις με δυο υλικά μέσα, που έχουν παρόμοια γεωμετρία με αυτήν της διεξαγωγής των πειραμάτων, η εξίσωση αυτή χρησιμοποιώντας τις τιμές των θεωρητικών παραμέτρων, πρέπει να παρέχει χοντρικές τιμές της  $R_{eff}$ .



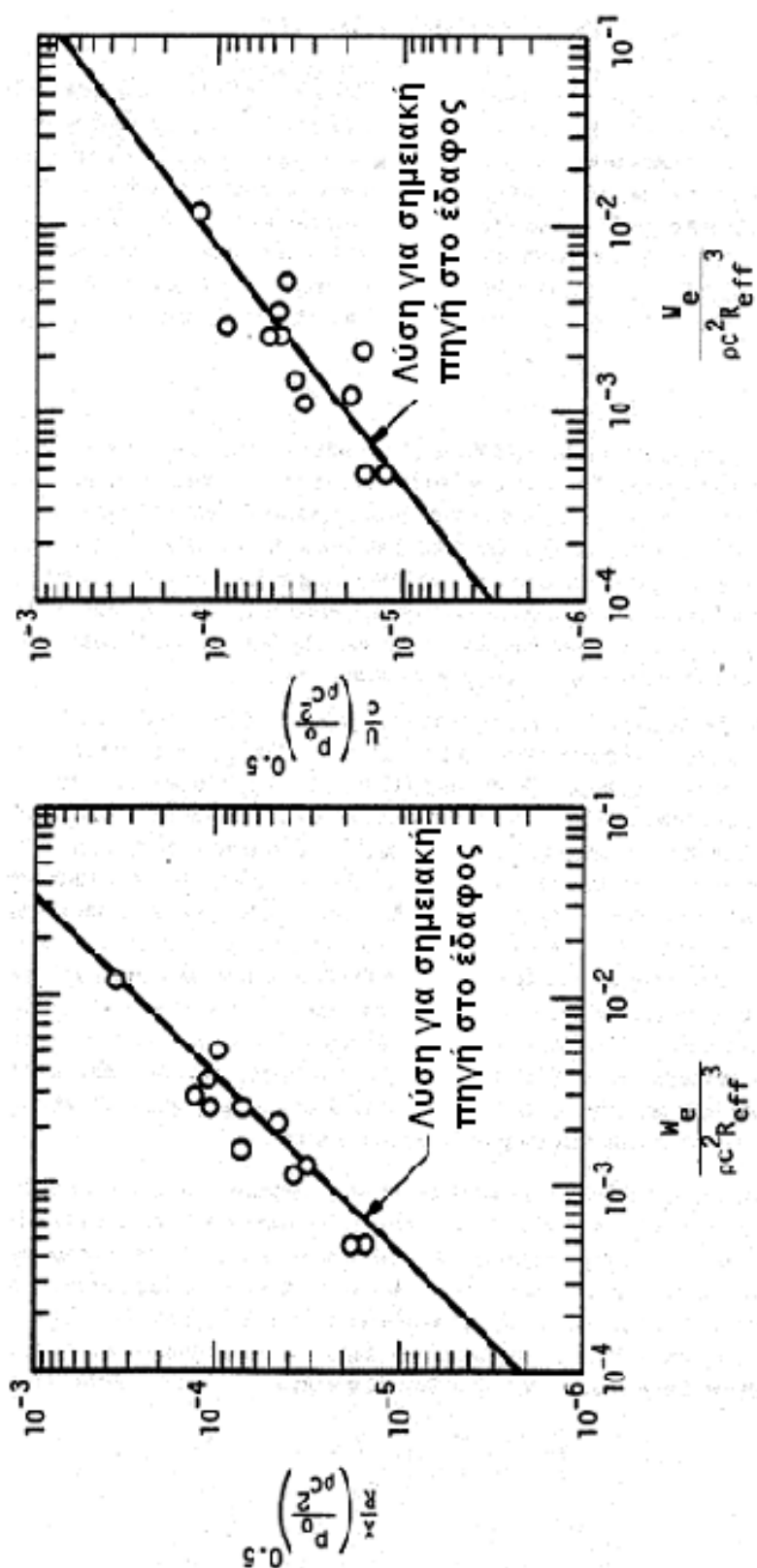
Σχήμα 6-6 : Σχεδιάγραμμα του πειράματος στο ύπαιθρο για σκυρόδεμα και έδαφος



όπου,

$$R_{eff} = 0.746 R \left( \frac{w_e}{\rho_s c_s^2 R_c^3} \right)^{0.028} \left( \frac{\rho_s c_s^2}{\rho_c c_c^2} \right)^{0.014}$$

Σχήμα 6-7 : Σύγκριση των τάσεων στον αγωγό για σκυρόδεμα /έδαφος, με την καμπύλη των λύσεων για σημειακή και παράλληλης γραμμής πηγή στο έδαφος, χρησιμοποιώντας την  $R_{eff}$



Σχήμα 6-8 : Σύγκριση των τιμών των εδαφικών μετατοπίσεων από τα πειράματα για σκυρόδεμα /έδαφος, με την λύση της σημειακής γόμωσης για το έδαφος, χρησιμοποιώντας την  $R_{eff}$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή:

1. Παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν οι βασικές υποθέσεις και παραδοχές της μεθόδου Esparza, et al., για τον προσδιορισμό των τάσεων σε έναν αγωγό από εκρήξεις σε μαλακό και σκληρό έδαφος.
2. Από την διερεύνηση που έγινε, οι αριθμητικοί συντελεστές των εξισώσεων αυτών μετατράπηκαν στο διεθνές σύστημα μονάδων, για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην χώρα μας.
3. Η μέθοδος Esparza, et al., είναι μια ημιεμπειρική μέθοδος, που στηρίζεται σε μια συνδυασμένη θεωρητική και πειραματική ανάλυση. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται σε περιορισμένες περιπτώσεις εδαφικών μηχανικών και γεωμετρικών παραμέτρων. Πριν εφαρμοστεί στη χώρα μας, θα πρέπει να ελεγχθεί η αξιοπιστία της, με συγκεκριμένα πειράματα.
4. Τα αποτελέσματα της μεθόδου έχουν αναπτυχθεί σε μαλακά εδάφη, ενώ λίγα έχουν επεκταθεί σε βραχώδη εδάφη. Τα αποτελέσματα που συναντήθηκαν στη πράξη για τα διάφορα είδα πηγών, θα πρέπει να παραχθούν για τις περιπτώσεις, που έχουν εξετασθεί σε μαλακά εδάφη.
5. Πριν εφαρμοσθεί η μέθοδος του Esparza, et al., στη χώρα μας, θα πρέπει να διερευνηθεί η ισοδυναμία του βάρους γόμωσης για το οποίο είχε αναπτυχθεί η μέθοδος, με το βάρος της γόμωσης των εκρηκτικών που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Επίσης, θα πρέπει να αναλυθούν τυχόν γεωμετρικές διατάξεις των πηγών που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, και οι διατάξεις αυτές να προσαρμοστούν σε αυτές που περιγράφονται στη μέθοδο.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### Α.1 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τα περισσότερα χημικά εκρηκτικά απελευθερώνουν σχεδόν την ίδια ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα βάρους  $W$ . Η παρατήρηση αυτή σημαίνει ότι αν η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιείται στις ανατινάξεις δεν είναι γνωστή, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις πρόβλεψης υποκαθιστώντας μια τυπική τιμή για την  $We$ . Οι μέσες τιμές της ενέργειας που απελευθερώνεται για μια σειρά εκρηκτικών του εμπορίου παρέχεται από τον Πίνακα 1, στο παράρτημα Β. Για τις εκρηκτικές ύλες που δεν αναφέρονται στον Πίνακα Β-1, στο Παράρτημα Β, θα πρέπει να συμβουλευτείτε τον παραγωγό. Για να περιγραφεί η άμεση χρήση των απλών γραμμικών λογαριθμικών εξισώσεων, παρέχεται το παρακάτω Παράδειγμα- Εφαρμογή Α-1:

#### Εφαρμογή Α-1

Μια σημειακή γόμωση των 1 Kg με 60% NG Dynamite θα πυροδοτηθεί θαμμένη σε έδαφος σε βάθος 1.22 m. Το ειδικό βάρος του εδάφους είναι  $19 \frac{KN}{m^3}$  και η ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος είναι  $300 \frac{m}{s}$ . Θα προσδιοριστεί η οριζόντια εδαφική μετατόπιση του υλικού σωματιδίου του εδάφους όταν η απόσταση μεταξύ του αγωγού και της πηγής είναι 5 m.

#### Λύση

(α) Υπολογίζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται από την έκρηξη, και η πυκνότητα

του εδάφους

$$W_e = (1.0 \text{ Kg}) \left( 5.08 \times 10^6 \frac{N \times m}{Kg} \right) = 5.76 \times 10^6 N \times m$$

$$\rho = \frac{\left( 19 \frac{KN}{m^3} \right)}{\left( 10 \frac{m}{sec^2} \right)} = 1.9 \frac{KN \times sec^2}{m^4}$$

$$c = 300 \frac{m}{sec}$$

$$R = 5 \text{ m}$$

$$p_o = 1 \text{ atm} = 101325 \frac{N}{m^2}$$

(b) Υπολογίζεται ο κάθε αδιάστατος όρος

$$\left( \frac{p_o}{\rho c^2} \right)^{0.5} = \left[ \frac{101325}{(1.9 \times 10^3)(300)^2} \right]^{0.5} = 2.43 \times 10^{-2},$$

και

$$\left( \frac{W_e}{\rho c^2 R^3} \right) = \left[ \frac{5.76 \times 10^6}{(1.9 \times 10^3)(300)^2 (5)^3} \right] = 2.69 \times 10^{-4}$$

(c) Αντικαθιστώντας τις γνωστές παραμέτρους στην εξίσωση (2.10) και λύνοντας ως προς X, προκύπτει:

$$\frac{X}{5.0} (2.43 \times 10^{-2}) = (0.0373) (2.69 \times 10^{-4})^{1.060}$$

$$X = 0.001260 \text{ m}$$

(d) Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.11) και λύνοντας ως προς U, προκύπτει:

$$\frac{U}{300}(2.43 \times 10^{-2}) = 0.00489(2.69 \times 10^{-4})^{0.79}$$

$$U = 0.009127 \frac{\text{m}}{\text{sec}}.$$

## A.2 ΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΑΓΩΓΟ

Κατά την εξαγωγή των εξισώσεων πρόβλεψης προσδιορισμού των τάσεων για την σημειακή πηγή και για πηγές που βρίσκονται σε παράλληλες γραμμές, πραγματοποιήθηκαν αντικαταστάσεις έτσι ώστε να έχουμε τις διάφορες παραμέτρους στις μονάδες που χρησιμοποιούνται στο πεδίο. Γι' αυτό η ενέργεια που απελευθερώνεται  $W$ , η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στις προβλέψεις για τις κινήσεις του εδάφους αντικαταστάθηκε από το  $nW$ . Η ποσότητα  $n$  είναι ένα μέτρο της απελευθερωμένης ενέργειας κατά τις εκρήξεις. Χρησιμοποιώντας ως βάση την ενέργεια που απελευθερώνεται από το εκρηκτικό ANFO (94/6), όλες οι ενέργειες που απελευθερώνονται κανονικοποιούνται για να προσδιοριστεί η τιμή του  $n$ . Έτσι, για το ANFO (94/6), το  $n$  έχει τιμή 1.00. Οι ανατινάξεις μεγαλύτερου ενεργειακού περιεχομένου, έχουν τιμή  $n$  μεγαλύτερη του 1.00 και αυτές με μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο έχουν μια τιμή του  $n$  μικρότερη του 1.00. Μια λίστα από τις ισοδύναμες απελευθερωμένες ενέργειες παρέχεται στο Πίνακα B-2, στο Παράρτημα Β. Για τις τιμές για τα εκρηκτικά που δεν αναφέρονται εδώ θα πρέπει να συμβουλευτείτε τους κατασκευαστές. Σημειώνεται ότι για τις σχετικές τιμές της απελευθερωμένης ενέργειας, που δεν διαφέρουν πολύ, μπορεί να υποτεθεί μια συγκεκριμένη τιμή για το  $n$ .

Για να περιγραφεί η χρήση της εξίσωσης 7 για την πρόβλεψη των τάσεων από μία σημειακή πηγή, ακολουθεί το παράδειγμα. A-2.

### Εφαρμογή A-2

Μια σημειακή πηγή των 11 N με 60% NG Dynamite είναι θαμμένη στο έδαφος σε



βάθος 1.22 m. Βρίσκεται δίπλα σε έναν αγωγό με 24 in = 0.61 m διάμετρο και πάχος τοιχωμάτων 0.312 in =  $7.9 \times 10^{-3}$  m, API-5L, ποιότητας “B”. Στην περιοχή αυτή ο αγωγός έχει μια εδαφική επικάλυψη 1m. Θα εκτιμηθεί η εφαπτομενική και διαμήκης τάση του αγωγού, όταν η γόμωση βρίσκεται σε απόσταση 4.5 m από τον αγωγό.

#### Λύση

(a) Η λίστα με τις παραμέτρους της εξίσωσης (2.76) με τις κατάλληλες μονάδες τους, είναι:

$$E=200000 \text{ MPa}$$

$$h=0.312 \text{ in} = 7.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$n=1.12$$

$$W=11 \text{ N}$$

$$R=4.5 \text{ m}$$

(b) Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.76) και λύνοντας ως προς τις τάσεις στον αγωγό, προκύπτει:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 0.0051135 \times E \times \left( \frac{nW}{\sqrt{Eh}(R)^{2.5}} \right)^{0.77},$$

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = (0.0051135)(200000) \left[ \frac{(1.12)(11)}{\sqrt{(200000)(7.9 \times 10^{-3})(4.5)^{2.5}}} \right]^{0.77},$$

από όπου

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 22.94 \text{ MPa} .$$

#### Εφαρμογή Α-3

7 σημειακές γομώσεις των 11 N με 60% NG Dynamite απέχουν μεταξύ τους 1 m θα πυροδοτηθούν θαμμένες στο έδαφος σε ένα βάθος 1.22 m. Η γραμμή με τις πηγές είναι παράλληλη σε αγωγό διαμέτρου 24 in = 0.61 m, με πάχος τοιχωμάτων 0.312 in =  $7.9 \times 10^{-3}$  m, API-5L και ποιότητας “B”, που έχει μια εδαφική επικάλυψη 1.0 m. Θα

εκτιμηθούν οι τάσεις στον αγωγό, όταν η γραμμή πηγής βρίσκεται σε απόσταση 4.5 m από τον αγωγό.

*Λύση*

(a) Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στην εξίσωσης 7 με τις κατάλληλες μονάδες τους, είναι :

$$E=200000 \text{ MPa}$$

$$h=0.312 \text{ in} = 7.9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$n=1.12$$

$$N1=7 \text{ πηγές}$$

$$L1= 1 \text{ m}$$

$$L=(7) (1) \text{ m} =7 \text{ m}$$

$$W1=11 \text{ N}$$

$$W=(7)(11) =77 \text{ N}$$

$$R=4.5 \text{ m}$$

(b) Επειδή  $R < L$ , αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3.15) τις υπεισερχόμενες παραμέτρους προκύπτει:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 0.0051135 \times E \times \left( \frac{1.4nW/L}{\sqrt{Eh}(R)^{1.5}} \right)^{0.77},$$

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = (0.0051135)(200000) \left[ \frac{(1.4)(1.12)(77/7)}{\sqrt{(200000)(7.9 \times 10^{-3})(4.5)^{1.5}}} \right]^{0.77},$$

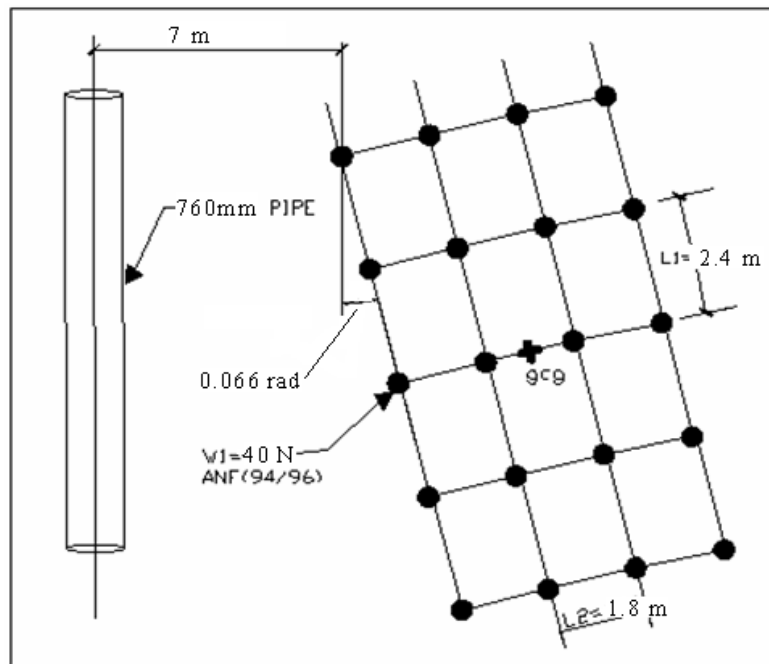
από όπου

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 94.64 \text{ Mpa}.$$

#### Εφαρμογή Α-4

Ο αγωγός που φαίνεται στο σχήμα έχει διάμετρο 30 in =0.76 m, πάχος τοιχωμάτων 0.344 in =  $9 \times 10^{-3}$  m και είναι θαμμένος σε απόσταση 7 m από τον κানাβο. Το κέντρο του αγωγού και οι γομώσεις έχουν τοποθετηθεί σε ένα βάθος 1.5 m.

Θα εκτιμηθούν οι τάσεις στον αγωγό από την πυροδότηση της πηγής.



Λύση

(α) Οι γνωστές παράμετροι με τις κατάλληλες μονάδες τους είναι:

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$h = 0.344 \text{ in} = 9 \text{ mm} = 9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$n = 1.0$$

$$N_1 = 5 \text{ γομώσεις}$$

$$L_1 = 2.4 \text{ m}$$

$$W_1 = 40 \text{ N}$$

$$B = 0.066 \text{ rad}$$

$$A = 7 \text{ m}$$

$$N_2 = 4$$

$$L_2 = 1.8 \text{ m}$$

(β) Προσδιορίζεται αν το δίκτυο μπορεί να απλοποιηθεί σε ισοδύναμη σημειακή πηγή.

(i) Από τις εξισώσεις (4.1) κι (4.2)

$$R = R_{gcl} / \cos B$$

$$R = \frac{\left[ A + \frac{(N1-1)(L1)(\sin B)}{2} \right]}{(\cos B)}$$

$$R = \frac{\left[ 7 + \frac{(5-1)(2.4)(\sin 0.067\pi)}{2} \right]}{(\cos 0.067\pi)},$$

$$R = \frac{\left[ 7 + \frac{(4)(2.4)(\sin 0.067\pi)}{2} \right]}{0.9779},$$

από όπου

$$R = 8.2 \text{ m} .$$

(ii) Από την σχέση (4.3) προκύπτει:

$$L = N1 \times L1 = 5 \times 2.4 = 12 \text{ m}$$

από όπου

$$L = 12 \text{ m} .$$

(3)  $R > 1.5 L$  ; Όχι. Επομένως θα εφαρμοστεί η λύση της παράλληλης γραμμής.

(c) Υπολογισμός των τάσεων

$$(i) \quad \frac{W}{L} = \frac{W1}{L1} = \frac{40}{2.4} = 16.7 \frac{N}{m}$$

$$(ii) \quad \sigma_{cir} = \sigma_{long} = 0.0051135 \times E \times \left( \frac{1.4nW/L}{\sqrt{Eh}(R)^{1.5}} \right)^{0.77}$$

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = (0.0051135)(200000) \left[ \frac{(1.4)(1.12)(16.7)}{\sqrt{(200000)(9 \times 10^{-3})(8.2)^{1.5}}} \right]^{0.77}$$

από όπου

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 62.1 \text{ Mpa} .$$

### Εφαρμογή Α-5

Μία σημειακή γόμωση των 89 *N* με δυναμίτη ANFO (94/6) είναι θαμμένη στο έδαφος σε απόσταση 7.5 *m* από έναν αγωγό διαμέτρου 0.61 *m*, με πάχος τοιχωμάτων 0.15 *m*, που έχει συντελεστή ελαστικότητας *E*=200000 *MPa*. Ο αγωγός και η γόμωση είναι θαμμένα σε μέτριο έδαφος στο ίδιο βάθος. Θα εκτιμηθούν οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό λόγω της διάδοσης του κύματος της έκρηξης στο έδαφος, καθώς και το βάρος της γόμωσης, αν υποθεθεί ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση είναι μόνο 20 *MPa*.

#### Λύση

Από τον Πίνακα 1, στο Παράρτημα Β, η ισοδύναμη απελευθερούμενη ενέργεια, για την ANFO (94/6), είναι *n*=1.0. Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην εξίσωση (2.76) και λύνοντας ως προς *σ*, είναι:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 0.0051135 \times E \times \left( \frac{nW}{\sqrt{EhR}^{2.5}} \right)^{0.77} ,$$

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = (0.0051135)(200000) \left[ \frac{(1.0)(89)}{\sqrt{(200000)(0.15)(7.5)^{2.5}}} \right]^{0.77} ,$$

από όπου

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} = 12.66 \text{ Mpa} .$$

Λύνοντας την εξίσωση (2.76) ως προς *W* και αντικαθιστώντας τις τιμές των άλλων παραμέτρων που είναι γνωστές, προκύπτει:

$$W = \frac{\sqrt{Eh}R^{2.5}}{n} \left( \frac{\sigma}{0.0051135E} \right)^{1/0.77},$$

από όπου

$$W = \frac{\sqrt{(2000000)(0.15)}(7.5)^{2.5}}{(1.0)} \left( \frac{20}{(0.0051135)(2000000)} \right)^{1/0.77},$$

ή

$$W = 161 \text{ N}.$$



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΙΝΑΚΕΣ

**Πίνακας Β-1: Η ενέργεια που απελευθερώνεται για διάφορους τύπους εκρηκτικών**

Εκρηκτικές ύλες	We ( N-m/Kg )
ANFO (94/6)	$4.54 \times 10^6$
AN Low Density Dynamite	$4.48 \times 10^6$
Comp B (60/40)	$5.08 \times 10^6$
Comp C-4	$5.08 \times 10^6$
HB-1	$3.89 \times 10^6$
NG Dynamite (40%)	$4.75 \times 10^6$
NG Dynamite (60%)	$5.08 \times 10^6$
Pentolite (50/50)	$5.02 \times 10^6$
RDX	$5.26 \times 10^6$
TNT	$4.45 \times 10^6$



**Πίνακας Β-2: Ισοδύναμες απελευθερούμενες ενέργειες για διάφορους τύπους εκρηκτικών**

<b>Εκρηκτικές ύλες</b>	<b>Normalizing Factor n</b>
ANFO (94/6)	1.00
AN Low Density Dynamite	0.99
Comp B (60/40)	1.12
Comp C-4	1.12
HB-1	0.86
NG Dynamite (40%)	1.12
NG Dynamite (60%)	-
Pentolite (50/50)	1.11
RD	1.16
TNT	0.98

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Τα σχήματα Γ-1 και Γ-2, είναι τα νομογραφήματα που δίνουν μια ολοκληρωμένη λύση για μια πηγή έκρηξης σημείου και για μια πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής αντίστοιχα. Σε αυτά τα σχήματα έχουν προστεθεί και αφαιρεθεί λογάριθμοι εώς όπου προσδιορίζεται η παραμόρφωση του αγωγού. Για παράδειγμα, για μιά πηγή σημείου, το Σχήμα Γ-1 αντιπροσωπεύει την εξίσωση (2.75) στην εξής μορφή :

$$[\log o] = 0.615[\log E] - 0.385[\log h] + 0.77[\log nW] - 1.925[\log R] + [\log 4.44] \quad (5.1)$$

Μιά παρόμοια έκφραση μπορεί να γραφτεί και για την πηγή μορφής παραλλήλης γραμμής.

Για την χρήση κάποιου από τα νομογραφήματα, αρχικά βρίσκουμε τον συντελεστή της ελαστικότητας το υλικού του αγωγού στον κατακόρυφο άξονα. Έπειτα, πηγαίνουμε στο κάτω αριστερό τεταρτημόριο του νομογραφήματος, όπου βρίσκουμε στον κάθετο άξονα που αντιπροσωπεύει τον συντελεστή ελαστικότητας την τιμή που βρήκαμε, και από αυτήν φέρνουμε οριζόντια γραμμή ως όπου να συναντήσει την λοξή γραμμή, που αντιστοιχεί στο πάχος του αγωγού που μας δίνεται. Στην συνέχεια φέρνουμε από αυτό το σημείο κάθετη γραμμή, που συνεχίζει στο πάνω αριστερό τεταρτημόριο του νομογραφήματος, όπου παρουσιάζεται το ισοδύναμο βάρος των γομώσεων και βρίσκουμε την προβολή πάνω στην γραμμή που έχει ως τιμή το βάρος των γομώσεων σε (lbs of ANFO), που μας δίνεται. Από αυτό το σημείο τομής, κάνουμε οριζόντια προβολή στο πάνω δεξί τεταρτημόριο, στην γραμμή που έχει τιμή την απόσταση μεταξύ του αγωγού και της γόμωσης. Τέλος, φέρνουμε κάθετη προβολή στον άξονα που αντιπροσωπεύει τις τάσεις. Η τιμή που βρίσκουμε είναι η τάση εφαπτομενική ή διαμήκης που ψάχνουμε.

Παρακάτω δίνεται την λύση της εφαρμογής A.5 με την χρήση του νομογραφήματος.

Οι παράμετροι ήταν :

$$E= 29.5 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$h=0.25 \text{ in.}$$

$$nW=20 \text{ lb}$$

$$R=25 \text{ ft}$$

Η μέγιστη τάση στον αγωγό που προσδιορίζεται από το νομογράφημα, είναι:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} \approx 6000 \text{ psi}$$

Δηλαδή στο SI, είναι:

$$\sigma_{cir} = \sigma_{long} \approx 6000 \times 0.006895 = 41.37 \text{ Mpa}$$

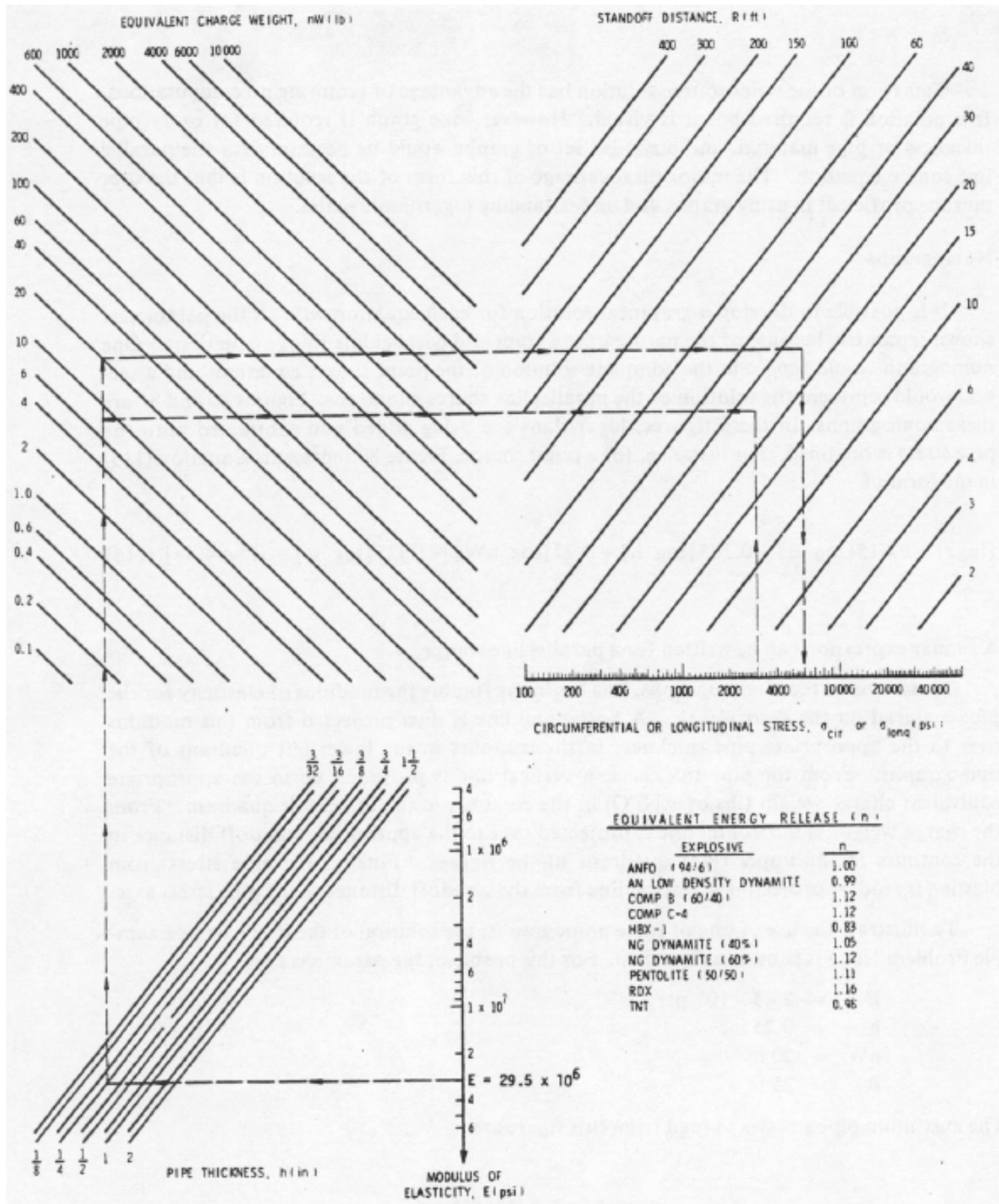
Τα νομογραφήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον προσδιορισμό ενός περιορισμένου αριθμού άλλων παραμέτρων, όταν είναι γνωστή η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση στον αγωγό. Για το δεύτερο μέρος της εφαρμογής No.5, από την τιμή  $3000 \text{ psi}$  στον άξονα των τάσεων φέρνουμε την κάθετη προβολή στην απόσταση μεταξύ του αγωγού και της γόμωσης των  $25 \text{ ft}$ . Έπειτα, φέρνουμε την οριζόντια γραμμή ως ώτου να τήμνει την κάθετη γραμμή που ξεκινάει από το πάχος του αγωγού. Η τομή των δυο γραμμών δίνει την τιμή του επιτρεπόμενου ισοδύναμου βάρους της γόμωσης ( $nW$ ), που είναι :

$$W \approx 8 \text{ lb},$$

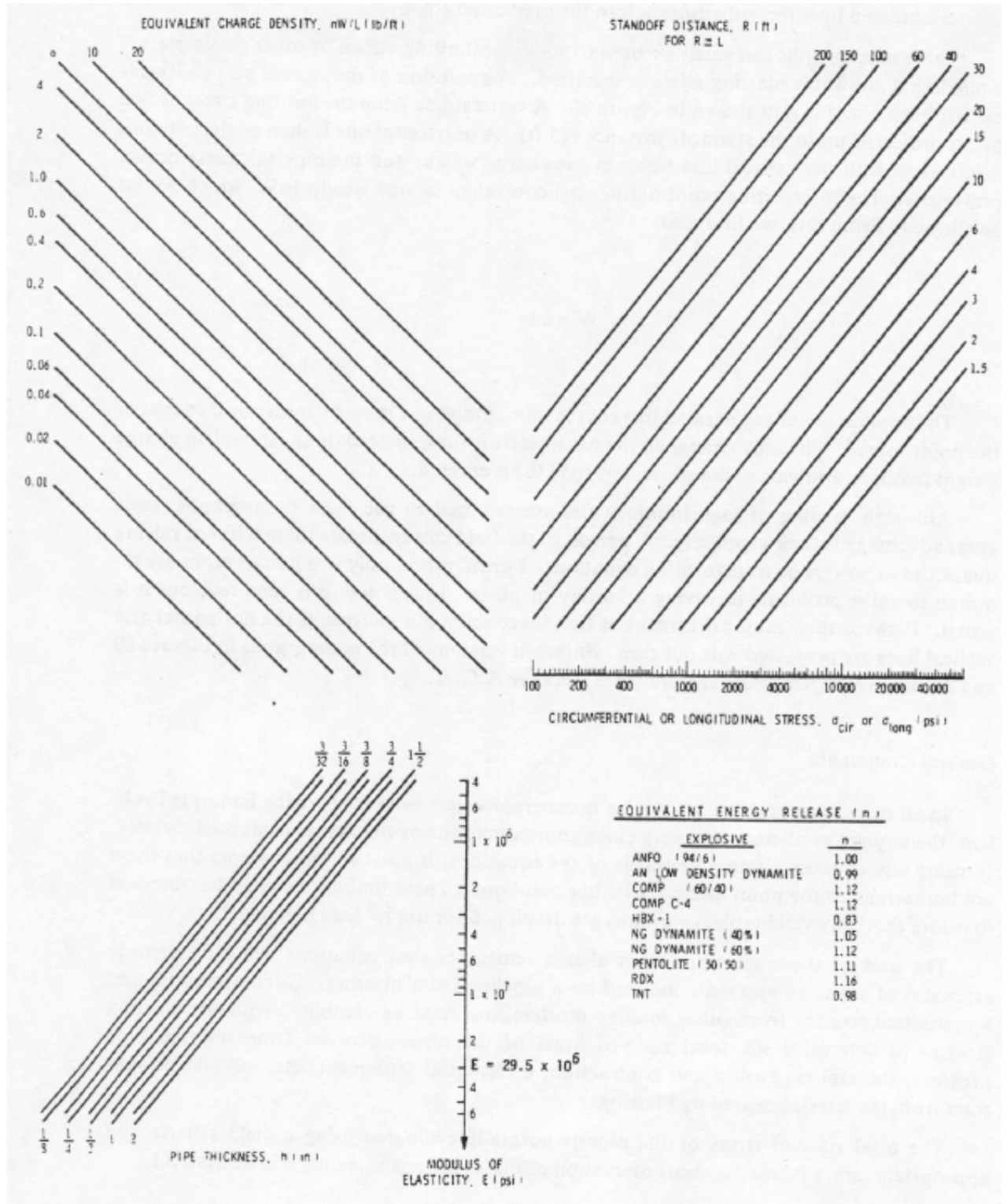
Το οποίο στο SI, αντιστοιχεί σε

$$W \approx 8 \times 4.448 \approx 36 \text{ N}.$$

Παρόμοια λειτουργούμε και για την πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής με την μόνη διαφορά, ότι όπου ( $nW$ ) χρησιμοποιείται ο λόγος ( $nW/L$ ).



Σχήμα Γ-1: Νομογράφημα προσδιορισμού των τάσεων σε αγωγό από σημειακή πηγή



Σχήμα Γ-2: Νομογράφημα προσδιορισμού των τάσεων σε αγωγό από πηγή με μορφή παράλληλης γραμμής

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adams M. W., R. G. Preston, P. L. Flanders, D. C. Sachs, and W. R. Perret (March 1961), *Summary Report of Strong-Motion Measurements, Underground Nuclear Detonations, Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 3, pp. 903ff.

Ambraseys, N. R. and Hendron, A. J. (1968), "Dynamic Behaviour of Rock Masses," *Rock Mechanics Engineering Practice*, pp. 203-227, (KG. Stagg and O.C. Zienkiewicz, Eds.), John Wiley & Sons, Inc., London.

Anderson, D. A., Winzer, S. R., and Ritter, A. P. (1985), "The Relationship Between Rock Structure and Delay Timing, Fragment Size, and Distribution in Explosively Loaded Rock," *Fragmentation by Blasting*, First Edition, Society of Experimental Mechanics, Brookfield Center, Connecticut.

Anon., Project Dribble Salmon (November 30 1965), "*Analysis of Ground Motion and Containment*", Roland F. Beers, Inc., Report to Atomic Energy Commission on Tests in Tatum Salt Dome, Mississippi, Final Report VUF-1026.

Austin (1990), "Extra Gelatins," Product Information Bulletin EG861, Austin Powder Company, Cleveland, Ohio.

Baker E. W., P. S. Westine, and F. T. Dodge (1973), "Similarity Methods In Engineering Dynamics", Spartan Division of Hayden Books, Rochelle Park, New Jersey.

Barkan, D. D., (1962), "*Dynamics of Bases and Foundations*", McGraw-Hill Book Company, New York.

Bridgman W. P. (1931), "Dimensional Analysis", Yale University Press, New Haven

Cranz C.(1926), "Lehrbuch der Ballistik", Vol. 2, Berlin.

Carder S. D. and W. K. 'Cloud (October 1959), "Surface Motion from Large Underground Explosions", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 10, pp. 1471-1487.

Crandell, F. J. (1949), "Ground Vibrations Due to Blasting and Its Effect Upon Structures," *Journal Boston Society of Civil Engineering*, Volume 36, pp. 245.

DenHartog J. P., (1947), "*Mechanical Vibrations*", 3rd Edition, McGraw Hill Book Company, New York.

Dowding H. Charles (1985), "Blast Vibration Monitoring and Control", Prentice-Hall, USA.

Dowding H. Charles (1996), "Construction Vibrations", Prentice-Hall, USA.

Esparza E.O., "Measurements of transient pipeline strains from underground detonations", Proceedings of the 1986 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics.

DuPont (1980), "Blasters' Handbook", Explosive Products Division, E.I. DuPont de Nemours & Co., Inc., Wilmington, Delaware.

Dvorak, A. (1962), "Seismic Effects of Blasting on Brick Houses," *Proce Geofyrikeniha Ustance Ceskoslavenski Akademik*, Volume 169, Geofysikalni Sbornik, pp. 189-202.

Edwards, A. T., and Northwood, T. D. (1960), "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures," *The Engineer*, Volume 210, pp. 538-546, September 30.

Esparza, E. D. and Westine, P. S. (July 1985), "Well Casing Response to Buried Explosive Detonations," Final Report, Project No. 06-7926, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.

Esparza, E. D., Westine, P. S., and Wenzel, A. B. (December 1980), "Pipeline Response to Nearby Explosive Detonations," 1980 Interim Annual Report, Project No. 02-5567, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.

Esparza, E. D., Westine, P. S., and Wenzel, A. B. (August 1981), "Pipeline Response to Buried Explosive Detonations," Final Technical Report, Project No. 02-5567, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.

Esparza, E. D. (October 1985), "Trench Effects on Blast-Induced Pipeline Stresses," Final Report, Project No.06-9348, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, April 1984, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Volume III, No. 10, pp. 1193-1210.

Grandell. J. F (1949), "Ground Vibrations Due to Blasting and Its Effect Upon Structures", *Journal of Boston Soc. Civil Engineers*, Vol. 36, pp. 245.

Grandell J. F (April 1960), "Transmission Coefficient for Ground Vibrations Due to Blasting", *Journal of Boston Soc. Civil Engineers*, Vol. 47, No. 2, pp. 142-168.

Green, R. H. and Green, M. W. (February 1986), "The Effect of Precise Millisecond Delays on Fragmentation at the Rock of Ages Quarry", *Proceeding of the Twelfth Conference on Explosives and Blasting*, Society of Explosives Engineers "Technique", Atlanta, Georgia.

Habberjam M. G. and J. T, Whetton (January 1952), "On the Relationship Between Seismic Amplitude and Charge of Explosive Fired to Routine Blasting Operations", *Geophysics*, Vol. 17, No. 1, pp. 116-128.

Hemphill, G. B. (1981), "Blasting Operations", McGraw-Hill Book Company, New York.

- Hendron, A. J. and Oriard, L. L. (1972), "Specifications for Controlled Blasting in Civil Engineering Projects," *Proceeding of the Twelfth Conference on Explosives and Blasting*, Society of Mining Engineers, AIME, Littleton, Colorado.
- Henrych J. (1979), "The Dynamics of Ekplōsion", Elsevier Publ., Amsterdam.
- Henrych J. (1979)3, "The Dynamics of Explosion", Elsevier Publ., Amsterdam.
- Hopkinson B.(1915), "British Ordnance Board Minutes" 13565.
- Hudson E. D., J. L. Alford, and W. D. Iwan (April 1961), "Ground Accelerations Caused by Large Quarry Blasts", *Bulletin of the Seismic Society of America*, Vol. 51, No. 2, pp. 191-202.
- Ichiro Ito (April 1953), "On the Relationship Between Seismic Ground Amplitude and the Quantity of Explosives in Blasting", *Reprint from Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyoto University, Vol. 15, No. 11, pp. 579-587.
- IRECO (1989), "Explosives Engineers' Guide", IRECO Incorporated, Salt Lake City, Utah.
- Kopp, J.W. and Siskind, D.E. (1986), "Effects of Millisecond-Delay Intervals on Vibration and Airblast From Surface Coal Mine Blasting," U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 9026.
- Lang, L. C., Bohus, G., Foldesi, J., and Benedek, D., "The Optimum Delay," Society of Explosives Engineers (February 1986), "Proceedings of the Second Mini-Symposium on Explosives and Blasting Research", Atlanta, Georgia.
- Langefors, U. and Kihlström, B. (1979), "The Modern Technique of Rock Blasting", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Langefors U., B. Kihlstrom, and H. Westerberg (February 1958), "Ground Vibrations in Blasting, Water Power", pp. 335-338,390-395, and 421-424.
- Lucole, S. W. and Dowding, C. H. (1979), "Statistical Analysis of Blast Emission Records from Quarrying, Mining and Construction Operations in the State of Illinois," Illinois Institute of Natural Resources, Document 79/02.
- Lysmer, J. and Waas, G. (February 1972), "Shear Waves in Plane Infinite Structures", *Journal of the Engineers Mechanics Division*, ASCE, Volume 98, pp. 85-105.
- May, T. W. and Bolt, B. A. (1982), "The Effectiveness of Trenches in Reducing Seismic Motion", Volume 10, pp. 195-210.
- McClure, G. M., Atterbury, T. V., and Frazier, N. A. (November 1964), "Analysis of Blast Effects on Pipelines," *Journal of the Pipelines Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*.



Morris G., (April 21, 1950), "The Reduction of Ground Vibrations from Blasting Operations", *Engineering*, pp. 430-433.

Murphey F. B., (March 1961), "Particle Motions Near Explosions in Halite", *Journal of Geophysical Research*, Vol; 66, No. 3, pp. 947ff.

Nicholls, A. W., Johnson, C. F., and Duvall, W. I. (1971), "Blasting Vibrations and Their Effects on Structures", U.S. Bureau of Mines Bulletin 656.

Northwood, T. D., Crawford, R., and Edwards, A. T. (May 1963), "Blasting Vibrations and Building Damage," *The Engineer*, Vol. 215, No. 5601.

Ricker N. (October 1940), "The Form and Nature of Seismic Waves and the Structure of Seismograms", *Geophysics*, Vol. 5, No. 4, pp. 348-366.

Segol, G., Lee, P. C. Y., and Abel, J. F. (June 1978), "Amplitude Reduction of Surface Waves by Trenches", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Volume 104, pp. 621-641.

Siskind, D. E., Stachura, V. J., and Raddiffie, K. S. (1976), "Noise and Vibrations in Residential Structures from Quarry Production Blasting," U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8168.

Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., and Dowding, C. H. (1980), "Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Blasting," U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8507.

Siskind O.E. and Stagg M.S. (1994), "Surface Mine Blasting near Transmission Pipelines", *Mining Engineering*, pp. 1357.

Siskind O.E. (1992), "Vibration Criteria for Surface Mine Blasting: Ten Years after" Bureau of Mines RI 8507/I Proceedings of the 17th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Las Vegas, v2.

Siskind O.E., Stagg M.S., Wiegand and Schulz O.I. (1994), "Surface Mine Blasting Near Pressurized Transmission Pipelines", Report of Investigations 9523, US Bureau of Mines.

Stagg KG. and Zienkiewicz O.C. (1979), "Rock Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, London.

Stagg, M. S. and Rholl, S. A. (August 1987), "Effects of Accurate Delays on Fragmentation for Single-Row Blasting in a 6.7m Bench," *Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Society for Experimental Mechanics, Bethel, Connecticut.

Teichmann. A. G and R. Westwater (April 12, 1957), "Blasting and Associated Vibrations", *Engineering*, pp. 460-465.

Thoenen, J. R. and Windes, S. L. (1942), “Seismic Effects of Quarry Blasting,” U.S. Bureau of Mines Bulletin 442.

Timoshenko S. (March 1956), “Strength of Materials, Part II: Advanced Theory and Problems, 3<sup>rd</sup> Edition”, Van Nostrand Company, Princeton, New Jersey.

Timoshenko S.P. and Woinowski-Krieger S. (1959), "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill, 2nd ed.

Walter, E. J. and Carroll, J. (February 1980), “Natural Variation of Vibration Level Associated with Blasting,” Society of Explosives Engineers, *Proceeding of the Sixth Conference on Explosive and Blasting Techniques*, Tampa, Florida.

Westine, P. S., Esparza, E. D., and Wenzel, A. B. (July 1978), “Analysis and Testing of Pipe Response to Buried Explosive Detonations,” Final Report, Project No. 02-4300, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas.

Wilson, W. H. and Holloway, D. C. (June 1987), “Instrumentation Techniques for Model Rock Blasting,” *Fracture of Concrete and Rock*, SEM-RILEM International Conference, Houston, Texas.

Willis E. D. and J. T. Wilson (July 1960), “Maximum Vertical Ground Displacement of Seismic Waves Generated by explosive Blasts”, *Bulletin of the Seismic Society of America*, Vol. 50, No. 3, pp. 455-459.

Woods D. R. (July 1968), “Screening of Surface Waves in Soils”, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 94, pp. 951-979.

EXTRACO S. A , Τα Νέα της EXTRACO, ΤΕΥΧΟΣ 8, ΕΤΟΣ 5, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2009, [www.extraco.gr/extraco/images/extraco\\_news\\_issue\\_8.pdf](http://www.extraco.gr/extraco/images/extraco_news_issue_8.pdf)

EXTRACO S. A , Τα Νέα της EXTRACO ,ΤΕΥΧΟΣ 6, ΕΤΟΣ 4, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2008, [http://www.extraco.gr/extraco/newsletters/EXTRACO\\_NEWS-ISSUE\\_6.pdf](http://www.extraco.gr/extraco/newsletters/EXTRACO_NEWS-ISSUE_6.pdf)

Δ. Καλιαμπάκος, ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ Ι, Όρυξη Στοών  
[www.metal.ntua.gr/uploads/2084/min\\_expI\\_no04.pdf](http://www.metal.ntua.gr/uploads/2084/min_expI_no04.pdf)

Ι.ΠΑΤΙΡΗΣ, Κανονισμοί Ασφάλειας Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Παρ. 26 / 2 / 2010, <http://www.plant-management.gr/index.php?id=72>